

Braun Tibor

A Nobel-díjra érdemes taxisofőr

A könyv megjelenését  
a Magyar Tudományos Akadémia  
támogatta





Braun Tibor

# A Nobel-díjra érdemes taxisofőr

Interdiszciplináris  
kémiai kaleidoszkóp

Lexica Kiadó  
2015

## AJÁNLÁS

*Klárinak, Krisztának, Nórának, Sárának, Andrisnak és Robinak,  
nemcsak azért, mert vannak*

## ELŐSZÓ

Az itt összegyűjtött válogatott közlemények a közelmúltban a *Magyar Kémikusok Lapjában* jelentek meg. Hangsúlyoznom kell, hogy ezeket nem tekintem szakcikkeknek. Stílusban a szakcikkek ortodox, de íratlan szabályok szerint íródnak, és bizonyos konvenciók elfogadását követelik. Ezek általában egyhangúvá és szárazzá, sőt szürkévé teszik őket. Ezzel szemben a jelen kötetben foglalt közlemények fő törekvése a kémia és a természettudomány minél színesebb, eredetibb, vonzóbb ismertetése és népszerűsítése. Természetesen követik a precizitás és szakmai megbízhatóság követelményeit, de azokat feltétlenül össze kellett egyeztetni a közérthetőséggel. Manapság a kémia népszerűsítésére annál is inkább szükség van, mert e szakterület lakossági vonzereje csökkenő tendenciát mutat, amit például a kémia iránt érdeklődő egyetemi felvételizők száma is jelez.

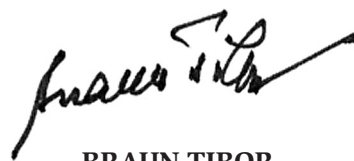
Az írások a kémia szakterületeinek olyan témáit érintik, amelyekről a világban folyó egyes irányzatokról, illetve aktuális kérdésekről tájékozódhat az olvasó. A tények szempontjából követtem Szilárd Leó, Hans Bethe-vel folytatott beszélgetés során kifejtetteket:

**Szilárd:** Csak a tényeket írom le, nem azért, hogy bárki is elolvassa, csakis a Jóisten számára.

**Bethe:** Nem gondolod, hogy a Jóisten ismeri a tényeket?

**Szilárd:** Lehet, hogy ismeri, **de nem a tényeknek ezt a változatát.**

Ez különösen az olyan interdiszciplináris témákra vonatkozik, amiknél új változatuk és világviszonylatban tekintett aktualitásuk mellett kreatívan meg kellett nyitni a nyelvi kapukat olyan kifejezések és fogalmak előtt, amelyek addig a magyar szakmai nyelvben nem voltak jelen. Végül köszönetet mondok Monok Istvánnak, a Magyar Tudományos Akadémia Könyvtár és Információs Központ főigazgatójának a szíves munkahelyi vendéglátásért, Braun András grafikus fiamnak a borító megtervezéséért és kivitelezéséért, a mindig és mindenben segítő személyes munkatársamnak, Trkala Marikának és a Magyar Tudományos Akadémia Kémiai Osztályának, különösképpen Hudecz Ferenc, Joó Ferenc, Orbán Miklós akadémikusoknak, akik lehetővé tették a Magyar Tudományos Akadémia anyagi hozzájárulásával e kötet megjelenését.



**BRAUN TIBOR**  
c. egyetemi tanár

## BEKÖSZÖNTŐ

Braun Tibor a *Magyar Kémikusok Lapja* egyik leglelkesebb és legsikeresebb szerzője. Csak 1986 óta, mióta én vagyok a lap felelős szerkesztője közel húsz cikket írt lapunkba. Mindegyik nagy olvasottságnak örvendett. Ért az olvasók nyelvén. Mutatja ezt, hogy olvasóink 2013-ban és 2014-ben is az év legjobb cikkei közé szavazták egy-egy munkáját. 2013-ban a „Mitoszrombolás hegedűvel. Stradivari-hangszerek akusztikai, kémiai és biotechnológiai jellemzése”, 2014-ben pedig „Gasztronómiai íz-, illat és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei” című írásai nyerték el olvasóink elismerését. Mindkét cikk megtalálható ebben a könyvben is.

Braun Tibor ragyogóan ír. Témaválasztása mindig célba talál. A témát nagyon közérthetően, olvasmányosan dolgozza fel. Nagyon megfelel annak a szakmai ismeretterjesztő szintnek, amely lapunk sajátja és olyannyira hiányzik. Ezekben a témákban nem tudományos cikkeket ír. Ebből fakadóan néha túlságosan is nagyvonalú. No, nem a tényekkel, inkább a fogalmakkal. Ebből adódtak kisebb konfliktusaink a szerkesztés során. A szerző rendkívül széles olvasottságú. Munkái sok esetben nem saját kutatásokon, hanem irodalmi feldolgozáson, összeállításon alapulnak. Ennél fogva sokat idéz mások munkáiból, az idézés szabályainak betartására mindig kényszerültem.

Írásainak célja, hogy a kémia pozitív oldalát mutassa meg. A kémia érdekességeiről szóljon, az élet, a mindennapok, a társtudományok, a művészetek területén mutassa meg a jelenlétét. Ezzel kívánja szolgálni a kémia társadalmi elismertségének növelését, mára kissé megroppant presztízsének helyreállítását. Személyesen is győződjön meg róla mennyire sikerült ezt Braun Tibornak írásaival elérnie. Jó olvasást kívánok mindenkinek!

Szeged, 2015. október 24.



**KISS TAMÁS**

egyetemi tanár

a Magyar Kémikusok Lapja

felelős szerkesztője

## CÍMFEJEZET

# A kémiai Nobel-díjra érdemes taxisofőr

## Douglas Prasher és a tudományos kutatás anyagi támogatottságának diszkrét bája

### Bevezetés

A tudományos „jutalomrendszer” [1] egyik legismertebb megjelenési formáját a tudományos díjak jelentik. A történelem folyamán a tudományos teljesítmény jutalmazására számos díjat hoztak létre és – az esetek többségében „meritokratikusan” – adományoztak olyan kutatóknak, akiket a díjak létrehozói arra alkalmasnak találtak. A körülmények rendkívül szövevényes alakulása következtében azonban egy díj egészen különleges tekintélyre tett szert, a tudományos díjak díjává, minden kutató elérhetetlennek hitt álmává, a tudomány Walhallájába való bejutás küszöbévé, a tudományos teljesítmény örökös elismerésének szimbólumává vált.

Ez a díj az Alfred Nobel svéd feltaláló által 1900-ban alapított és 1901-ben először kiosztott Nobel-díj, amely külön-külön a fizikában, a kémiában, valamint az élettudományok (fiziológia és orvostudomány) területén elért kimagasló kutatási teljesítményeket honorálja. A Nobel-díjnak, keletkezésének, működésének, eddigi történelmének is jelentős szakirodalma van, érdeklődő ingyeneknek figyelmébe ajánlhatók Hargittai István [2] és Harriet Zuckerman [3] kiváló monográfiái, de talán a díjátadások ünnepélyességét ismertető mű is [4].

Hadd említsük itt meg, hogy a Nobel-díj odaítélésére vonatkozó meglehetősen szigorú alapszabályok egyike háromra korlátozza azon kutatók számát, akik egyazon felfedezésért Nobel-díjat kaphatnak. A díjazottak kiválasztásának aránylag szövevényes eljárása, valamint a svéd Nobel Bizottság döntéseinek titkos, sőt néha titokzatos volta ellenére a szakirodalom elismeri, hogy a díjakkal – fennállásuk 110 éve alatt – csaknem kivétel nélkül az azokra érdemeseket tüntették ki. Ennek ellenére nem titkolható el, hogy a tudományos kutatási tevékenység ipari méretűvé fejlődése során a mindenkori díjakra érdemesek nagy száma miatt nemritkán a díjazottak számának Alfred Nobel által három személyre való korlátozása azt eredményezte, hogy a díjból olyan kutatók maradtak ki, akik ugyanúgy rászolgáltak volna a díjra, mint a díjazottak.

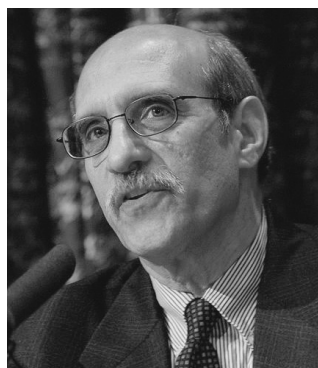
Nem felesleges talán annak a ténynek a megemlítése, hogy a tudomány és a tudományos kutatás már fentebb említett nagymértékű fejlődése az utóbbi több száz év során azzal is együtt járt, hogy a fejlődés a tudományos szakterületeket az interdiszciplinaritás [5] felé terelte. Ez már régebben is érzékelhető volt, de az utóbbi időben például a fizika, a kémia és az élettudományok között egyre inkább elmosódtak a szigorú szakterületi határvonalak. Ez többek között az említett három szakterület Nobel-díjai esetében is jól megfigyelhető. Erre számos példa sorolható, de talán itt egy is elegendő. Ronald Belcher, a kitűnő angol kémikus írta már 1978-ban: „legalább négy vegyészt tüntettek ki Nobel-díjjal analitikai kémiai felfedezésekért, de jelentősnek tekinthető, hogy mind a négy esetben a megfelelő felfedezés a biokémia fejlődését gyarapította” [6].

Nem érdektelen igazolása a fentieknek a 2008-ban Martin Chalfie-nak (USA), Osamu Shimomura-nak és Roger Tsiennek (USA) odaítélt kémiai Nobel-díj a kémia és biológia (biokémia) határterületén végzett kutatásokért a zöld fluoreszcens fehérje (GFP: Green Fluorescent Protein, magyarul ZFF) felfedezéséért és gyakorlati alkalmazásáért.

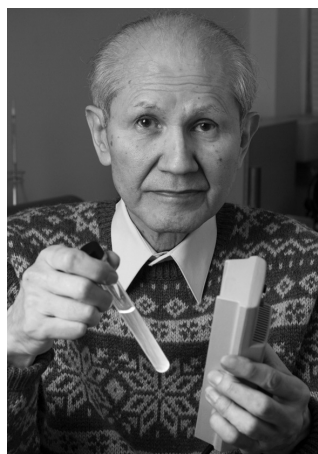
A 2008-beli kémiai díj és a díjazottak ismertetése a szakirodalomban és a médiában könnyen hozzáférhető [7–9].

Jelen dolgozat címére utalva talán az keltene nagyobb olvasói vagy általános érdeklődést, ha a történet arról szólna, hogyan válhat egy egyszerű taxisofőr tudományos Nobel-díjra érdemesé, sőt az izgalmat fokozva tudományos Nobel-díjassá.

Annak ellenére, hogy a mai világban sokan azt mondják, hogy minden lehetséges, sőt, mindennek az ellenkezője is, történetünk valóban a fentiek fordítottjáról szól, azaz arról, hogyan vezethet egy tudományos kutató útja a valóban Nobel-díj értékű kutatási eredményeket elérő szinttől a taxisofőrségig.



**Martin Chalfie**  
(kémiai Nobel-díj, 2008)



**Osamu Shimomura**  
(kémiai Nobel-díj, 2008)



**Roger Tsien**  
(kémiai Nobel-díj, 2008)

## A kémiai Nobel-díjra érdemes taxisofőr

Történetünk hőse, Douglas Prasher 1951 augusztusában született. 1979-ben doktorátust (PhD) szerzett biokémiából az Ohioi Állami Egyetemen. 1979 és 1983 között biokémiai és genetikai kutatásokat végzett a Georgiai Egyetemen és ezek az *Aequorea victoria* nevű medúzából kivont aequorin klónozásához vezettek. Ezután biolumineszcenciával foglalkozott a Woods Hole-i Óceánográfiai Intézet biológiai osztályán. 1988-ban négy évre szóló, 220 000 dolláros kutatási támogatást kapott az Amerikai Rákkutató Társaságtól a GFP (ZFF) génjének klónozásával kapcsolatos kutatásokra. Prasher sikeresen oldotta meg ezt a feladatot, és közben eredményeit ismertette a vele már kommunikációs kapcsolatban álló Martin Chalfie-val és Roger Tsien-nel, sőt klónozott cDNS-mintákat is átengedett nekik. Prasher kutatásai lassabban haladtak a ZFF fluoreszkálásának tanulmányozásában, miközben Chalfie és Tsien sikeresebbek voltak e téren. A ZFF-et később biokémiai nyomjelzőként alkalmazták például fehérjék in vivo vizsgálatánál [19]. Prashernek azonban nem sikerült állandó állást szereznie a Woods Hole-i Intézetben, miután a kutatásra az ösztöndíjjal anyagilag támogatott mind a négy évet egy a ZFF-hez illő genetikai szekvencia keresésével töltötte, aminek befejezése előtt a kutatási pénz elfogyott. Prasher ezután újabb kutatási pályázatot nyújtott be a Nemzeti Egészségügyi Intézeteknek (National Institutes of Health) a ZFF témában, de pályázatát elutasították. A következőkben Prasher populációgenetikusként dolgozott az Egyesült Államok Mezőgazdasági Minisztériumához tartozó Cape Code-i Otis Növényvédelmi Központban, majd később átment a beltoville-i (Maryland) Növény Csíraplazma Karantén és Biotechnológiai Laboratóriumba. Miután itt is kimerült kutatási támogatása, a huntsville-i NASA-hoz tartozó AZ Technologynál dolgozott, ahol egy újabb támogatási elvonás után elvesztette állását. Ezután Prasher képtelen volt állást találni a tudományos kutatásban, és miután megtakarított pénze elfogyott, el kellett vállalnia egy 10 dolláros óradíjjal fizetett taxisofőri állást a huntsville-i Bill Penney Toyota cégnél, mert öttagú családját el kellett tartania.

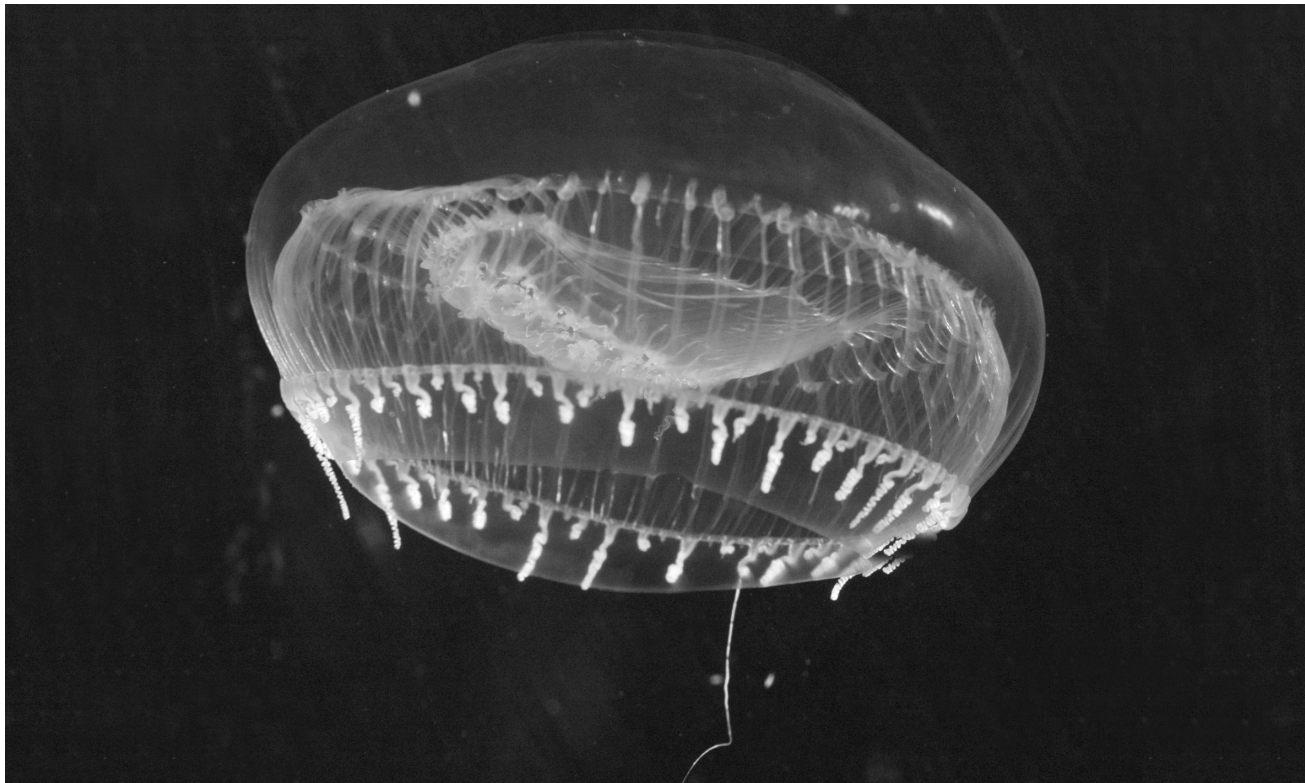
A 2008. évi kémiai Nobel-díj kihirdetésekor Martin Chalfie, az egyik egyesült államokbeli díjazott a következőket nyilatkozta: „Prasher munkássága lényeges és fontos volt a laboratóriumban végzett kutatásainkhoz. Azok (a Nobel Bizottság) minden további nélkül engem kihagyva Douglasnak és a másik kettőnek adhatták volna a díjat” [8].

## Kérdőjelek és elemzés

Egy tudományos kutató karrierjének történetét természetesen számos szögből lehet elemezni, ezek közül csak egyike a lehetőségeknek a kutató témájának és az ahhoz kötött mérföldkövek kronológiájának az áttekintése. Nem szükséges különösebb analitikai véna annak észrevételéhez, hogy a témában az 1955 és 2008 közötti több mint 40 év során keletkezett legjelentősebb publikációk közül ötnek Prasher első szerzője vagy társszerzője volt, külön hangsúlyozva, hogy csak 1977-ben kezdte meg tudományos kutatói munkásságát.

Kristálymedúza (*Aequorea victoria*)

Sierra Blakely felvétele







Douglas Prasher, a kutató



Douglas Prasher, a taxisoőr

### A ZFF felfedezésének kronológiája a kezdetektől a Nobel-díjig [9]

- 1955** Medúzákból kivont zöld fluoreszkáló anyag első leírása [10]
- 1962** 10 000 medúzából kivont anyag fehérjeként való azonosítása [11]
- 1969** A „zöld fehérje” zöld fluoreszkáló fehérjének elnevezése [12]
- 1974** Sephadex oszlopon való együttes adszorpció során intermolekuláris energiaátadás aequorin és ZFF között a medúzában [13, 14]
- 1979** Shimomura meghatározza a ZFF kromofort [15]
- 1985** Prasher klónozza és leírja az aequorint [16]
- 1992** ZFF klónozása, nem fluoreszcens apoZFF előállítás [17]
- 1993** ZFF kromofor szerkezetének az igazolása. Aminosav-maradékok korrigálása Shimomura 1979-beli szerkezetében [18]
- 1994** ZFF beépítése *E. coli*-ba [19, 20] és *C. elegans*-ba [21]. Kromofor képződésének mechanizmusa. Új szín (kék) és oxigénfüggés leírása [22]
- 1995** Az S65T ZFF poszttranszlációs oxidálása gyorsabb, mint a wt-ZFF-é [23]. A fokozott ZFF (FZFF) eredetének leírása
- 1996** ZFF kristályszerkezetének leírása [24, 25]. Tsien jellemzi a T203Y-t az S65T ZFF alapján. Ez utóbbi sárgán fluoreszkál [24]
- 1997** Két, kalmodulin-kötő doménnel kapcsolt fluoreszcens fehérje között fellépő FRET-jelenség (a Kaméleon nevű kalciumszenzor)
- 1999** Vörösen fluoreszkáló fehérjék (VFF) felfedezése korallokban [26]
- 2000** Időben változó színű fehérje felfedezése [27]
- 2002** VFF monomer [28–30], fotokonvertibilis és fotoaktiválható FA-ZFF [31] felfedezése
- 2003** Fehérjék irreverzibilis fotokonverziója nem fluoreszcensről stabilis vörös fluoreszkálásra fotoaktivációval [32]
- 2004** Új FF in vitro előállítása [33] és in vivo fejlődése [34]
- 2007** Távoli vörös FF. FF-alapú molekuláris hőmérő [35]
- 2008** Vörös kromoforhoz vezető *Aequorea victoria* ZFF előállítása [36]

Közismert, hogy az Egyesült Államok tudományos kutatásának döntő része az úgynevezett grant (granting) rendszeren alapul, azaz a kutatáshoz szükséges anyagi támogatáshoz pályázni kell az e célra létrehozott állami vagy magán intézményeknél. A kutatási támogatás összege legtöbb esetben (de nem mindig) magában foglalja a kutató létfenntartásához szükséges fizetést, valamint a kutatáshoz szükséges eszközök stb. költségeit is.

A kutatási támogatásokat nyújtó intézményekre kivétel nélkül igaz a primitíven hangzó, de feltétlenül valós a „több az eszkimó, mint a pingvin” közhely, magyarul a sok pályázó közül a támogatásra méltóknak tartottakat valamilyen eljárás szerint ki kell választani. Ezt a feladatot általában az e célra kifizetett és felállított úgynevezett szakértői bizottságok szokták ellátni.

Ezeknek a bizottságoknak a döntési mechanizmusa, a döntéshozatal folyamatai és részletei nemcsak az Egyesült Államokban, hanem mindenütt a világon általában bizalmasak, sok esetben titkosak és csaknem mindig áttekinthetetlenek.

A fentiek ismeretében Prasher esetében a „Vajon ez hogyan történhetett meg?” kérdéssel – a helyes válasz reménytelensége miatt – egyáltalán nem szabadna foglalkozni. A mindenütt jelen levő kíváncsiság alapján azonban talán ez esetben is felvethető néhány kérdés, amin érdemes elgondolkodni. Például az, hogy az Amerikai Rákkutató Társaság megfelelő pályázati bizottsága vajon milyen kritérium- és döntésmechanizmus szerint ítélte meg 1988-ban Prashernek három évre egy 220 000 dolláros kutatási

## A kémiai Nobel-díjra érdemes taxisofőr

támogatást, amikor még csak egyetlen jelentős publikációja [16] volt a témában. Ehhez persze rögtön hozzá kell tenni, hogy az amerikai orvos-biológiában fontosnak tartott témákban ez a támogatás nem számít igazán nagynak. Ahhoz azonban elégnék bizonyult, hogy a négy év során végzett kutatásairól társszerzőként később újabb négy jelentős közleményt publikáljon. Ezek után teljesen érthetetlen, hogy Prasher 1992-ben benyújtott pályázata miatt és mitől talált elutasításra. Annál is inkább, mert akkor már ismertek voltak Prasher alapvető és a teljes ZFF-témát megalapozó eredményei. Valószínű, hogy a fent említett bizottsági döntések a homályban maradt döntési mechanizmus következtében máshol és mással is előfordultak, de csaknem biztosnak tekinthető, hogy ez az ítélet volt az első lépés Prasher tudományos kutatói karrierjének a romba döntéséhez. Jelen szerző nem ismer a Nobel-díjak és környékének történetében más ilyen vagy hasonló lefutású esetet.

### IRODALOM

- [1] J. Gaston, The Reward System in British and American Science, John Wiley and Sons, New York, 1975.
- [2] I. Hargittai, The Road to Stockholm. Nobel Prizes, Science and Scientists, Oxford University Press, Oxford, 2002.
- [3] H. Zuckerman, Scientific Elite. Nobel Laureates in the United States, The Free Press, New York, 1979.
- [4] U. Söderlind, The Nobel Banquets. A Century of Culinary History (1901–2001), World Scientific, New Jersey, Singapore, 2005.
- [5] P. Weingart, N. Stehr (Eds.), Practicising Interdisciplinarity, University of Totonto Press, Toronto, 1999.
- [6] R. Belcher, The Analyst (1978) 103, 29.
- [7] <http://www.councoll.edu/ccacad/zimmer/GFP-ww/timeline.html>
- [8] <http://www.blog.prathambooks.org/2008/10/image-via-wikipedia-in-osamu.html>
- [9] <http://www.conncoll.edu/ccacad/Zimmer/GFP-WW/timeline.html>
- [10] D. Davenport, J. A. C. Nicol: Luminescence of Hydromedusae. Proc. R. Soc. London, Ser. B (1955) 144, 399–411.
- [11] O. Shimomura, F. H. Johnson, Y. Saiga: Extraction, Purification and Properties of Aequorin, a Bioluminescent Protein from the Luminous Hydromedusan, Aequorea. J. Cell. Comp. Physiol. (1962) 59, 223–29.
- [12] J. W. Hasting, J. G. Morin: Comparative Biochemistry of Calcium-activated Photoproteins from the Ctenophore, Mnemiopsis, and the Coelenterates Aequorea, Obelia, Pelagia and Renilla. Biol. Bull. (1969) 137, 402.
- [13] J. G. Morin, J. W. Hastings: Energy Transfer in a Bioluminescent System. J. Cell Physiol. (1971) 77, 313–18.
- [14] H. Morise, O. Shimomura, F. H. Johnson, J. Winant: Intermolecular Energy Transfer in Bioluminescent Systems of Aequorea. Biochemistry (1974) 13, 2656–62.
- [15] O. Shimomura: Structure of the Chromophore of Aequorea Green Fluorescent Protein. FEBS Letters (1979) 104, 220–22.
- [16] D. Prasher, R. O. McCann, M. J. Cormier: Cloning and Expression of the cDNA Coding for Aequorin, a Bioluminescent Calcium-Binding Protein. Biochemical and Biophysical Research Communications (1985) 126, 1259–68.
- [17] D. C. Prasher, V. K. Eckenrode, W. W. Ward, F. G. Pendergast, M. J. Cormier: Primary Structure of the Aequorea Victoria Green Fluorescent Protein. Gene (1992) 111, 229–33.
- [18] C. W. Cody, D. C. Prasher, W. M. Westler, F. G. Pendergast, W. W. Ward: Chemical Structure of the Hexapeptide Chromophore of the Aequorea Green Fluorescent Protein. Biochemistry (1993) 32, 1212–18.
- [19] M. Chalfie, Y. Tu, G. Euskirchen, W. W. Ward, D. C. Prasher: Green Fluorescent Protein as a Marker for Gene Expression. Science (1994) 263, 802–05.
- [20] S. Inouye, F. Tsuji: Evidence for Redox Forms of the Aequorea Green Fluorescent Protein. FEBS Letters (1994) 351, 211–14.
- [21] R. Heim, D. C. Prasher, R. Y. Tsien: Wavelength Mutations and Posttranslational Autoxidation of Green Fluorescent Protein. Proc. Natl. Acad. Sci. USA (1994) 91, 12501–04.
- [22] R. Heim, A. Cubitt, R. Y. Tsien: Improved Green Fluorescence. Nature (1995) 373, 663–64.
- [23] M. Ormo, A. B. Cubitt, K. Kallio, L. A. Gross, R. Y. Tsien, S. J. Remington: Crystal Structure of the Aequorea Victoria Green Fluorescent Protein. Science (1996) 273, 1392–95.
- [24] F. Yang, L. G. Moss, G. N. Phillips: The Molecular Structure of Green Fluorescent Protein. Nature Biotechnology (1996) 14, 1246–51.
- [25] A. Miyawaki, J. Llopis, R. Heim, J. M. McCaffrey, J. A. Adams, M. Ikura, R. Y. Tsien: Fluorescent Indicators for Ca<sup>2+</sup> Based on Green Fluorescent Proteins and Calmodulin. Nature (1997) 388, 882–87.
- [26] A. Miyawaki, O. Griesbeck, R. Heim, R. Y. Tsien: Dynamic and Quantitative Ca<sup>2+</sup> Measurements Using Improved Cameleons. Proc. Nat. Acad. Science (1999) 96, 2135–40.
- [27] A. Terskikh, A. Fradkov, G. Ermakova, A. Zaraisky, P. Tan, A. V. Kajava, X. N. Zhao, S. Lukyanov, M. Matz, S. Kim, I. Weissman, P. Siebert: „Fluorescent timer”: Protein that Changes Color with Time. Science (2000) 290, 1585–88.
- [28] L. A. Gross, G. S. Baird, R. C. Hoffman, K. K. Baldrige, R. Y. Tsien: The Structure of the Chromophore within DsRed, a Red Fluorescent Protein from Coral. PNAS (2000) 97, 11990–95.
- [29] R. E. Campbell, O. Tour, A. E. Palmer, P. A. Steinbach, G. S. Baird, D. A. Zacharias, R. Y. Tsien: A Monomeric Red Fluorescent Protein. PNAS (2002) 99, 7877–82.
- [30] H. Mizuno, T. K. Mal, K. I. Tong, R. Ando, T. Furuta, M. Ikura, A. Miyawaki: Photo-induced peptide cleavage in the green-to-red conversion of a fluorescent protein. Molecular Cell (2003) 12, 1051–58.
- [31] G. H. Patterson, J. Lippincott-Schwartz: A Photoactivatable GFP for Selective Photolabeling of Proteins and Cells. Science (2002) 297, 1873–77.
- [32] D. M. Chudakov, V. V. Belousov, A. G. Zaraisky, V. V. Novoselov, D. B. Staroverov, D. B. Zorov, S. Lukyanov, K. A. Lukyanov: Kindling Fluorescent Proteins for Precise in vivo Photolabeling. Nature Biotechnology (2003) 21, 191–94.
- [33] N. C. Shaner, R. E. Campbell, P. A. Steinbach, B. N. G. Giepmans, A. E. Palmer, R. Y. Tsien: Improved Monomeric Red, Orange and Yellow Fluorescent Proteins Derived from Discosoma sp Red Fluorescent Protein. Nature Biotechnology (2004) 22, 1567–72.
- [34] D. Shcherbo, E. M. Merzlyak, T. V. Chepurnykh, A. F. Fradkov, G. V. Ermakova, E. A. Solovieva, K. A. Lukyanov, E. A. Bogdanova, A. G. Zaraisky, S. Lukyanov, D. M. Chudakov: Bright Far-Red Fluorescent Protein for Whole-body Imaging. Nature Methods (2007) 4, 741–46.
- [35] F. H. C. Wong, D. S. Banks, A. Abu-Arish, C. Fradin: A Molecular Thermometer Based on Fluorescent Protein Blinking. Journal of the American Chemical Society (2007) 129, 10302–3.
- [36] A. S. Mishin, F. V. Subach, I. V. Yampolsky, W. King, K. A. Lukyanov, V. V. Verkusha: The First Mutant of the Aequorea Victoria Green Fluorescent Protein that Forms a Red Chromophore. Biochemistry (2008) 47, 4666–73.



# Mítoszrombolás hegedűvel

## Stradivari-hangszerek akusztikai, kémiai és biotechnológiai jellemzése

A címben szereplő témának csaknem áttekinthetetlen a nyomtatott és elektronikus irodalma. Jelen dolgozatban ebből kiindulva természetesen nem monografikus feldolgozásra tettünk kísérletet, hanem a kérdéssel foglalkozó, főleg legújabb, lehetőleg az utóbbi körülbelül tíz évben elért eredményeket kívántuk áttekinteni, különös tekintettel a tudományos jellegű vizsgálatokra.

### Bevezetés

Mennyei hangok és horribilis értékek (árak) jellemezték az idők folyamán és jellemzik ma is a cremonai mester, Antonius Stradivari (1644–1737) hegedűit (1. ábra). Állítólag 1100 darabot készített életében, és ezekből valószínűleg körülbelül 650 máig megmaradt. E hegedűk darabára, amennyiben eladásra kerülnek, illetve becsült értékük egy- és húszmillió dollár között mozog. Persze, az évszázadok során minden hegedűművész (Paganini is) egy „Stradivariról” álmodott. Ebből kifolyólag milliókat bűvöltek el a világ koncerttermeiben a Stradivarikból elővarázsolt mennyei hangok.

Mielőtt a hegedűkészítés, a Stradivari hangjának, illetve az azzal kapcsolatos mítoszoknak a részletezésébe merülnénk, talán érdemes egy kis magyar vonatkozású irodalmi kitérőt tennünk: az erdélyi, eredetileg festőművész, de az első világháborúban fejlődés következtében megvakult és jeles íróvá vált Szántó György 1934-ben adta ki *Stradivari* című regényét, amely azóta több mint 30 kiadást ért meg, és utoljára 2006-ban jelent meg. [1] „A regény többszálú cselekményének egyik fő ága a 17. század végi, 18. század eleji Cremona városába, a hegedű szülőhazájába vezet. A regény fő alakja a csendes, nyugodt, de belső tűz hevítette *Antonio Stradivari*, kinek *Beatrice Amati* iránti szerelme bűvópatakként vonul végig a könyvön. A regény régi korokat felidéző fejezeteit Stradivari 1681-ben alkotott mesterhegedűjének kalandos sorsa és tulajdonostól tulajdonosig történő vándorlása kapcsolja össze. A mű végén a húrok egybecsengenek, majd a klasszikus zenemű akkordjai elhalkulnak és elhallgatnak.” [2] Megemlítendő egy, a Szántó-műnél lényegesen korábbi Stradivari-életregény is. [3]

Az idők folyamán számtalan kísérlet, próbálkozás született a Stradivari-hegedűk isteni hangjának értelmezésére, magyarázatra, illetve hasonló hangminőségű új hegedűk megalkotására, és persze a megfelelő mítoszok is kialakultak.

### A Stradivari-hegedűk mítosza

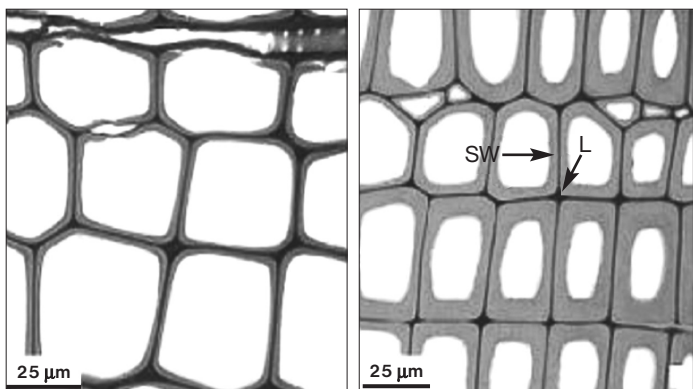
Nem árt, ha a mítosz fogalmának több szótári értelmezéséből [4] itt megjelenítenénk azt, amire a továbbiakban gondolunk: „az egyén, közösség cselekvéseit természetfölöttivé nagyító elbeszélés, monda”.

**Az első mítosz** arra vonatkozik, hogy a Stradivari-hegedűk zenei hangzása jobb, mint az azóta alkotott legjobb modern hegedűké, tekintet nélkül arra, hogy ki szólaltatja meg a hegedűt, beleértve a legeslegjobb virtuózokat is. Egy alapmű említését nem kerülhetjük el, ugyan az nem mítoszként, hanem rejtélyként foglalkozik a kérdéssel. Karl Fuhr *A hegedű akusztikai rejtélyei. A hegedűhang probléma végleges megoldása, fizikusoknak, hegedűépítőknek és zenészeknek ajánlva* című, eredetileg németül,

1. ábra. A Spanyol Királyi Palotában kiállított Stradivari II.-hegedű (körülbelül 1687-ből) [10, 24]



2. ábra. Új fa (bal) és régi fa (jobb) sejtszerkezete [12]



## Mítoszrombolás hegedűvel

1926-ban megjelent könyvére gondolunk. [5] A kérdés bőséges újabb szakirodalmából megbízható forrásbeli példákat választottunk és azokat a továbbiakban ismertetjük. [6, 7]

Egyetemi kutatók nemrégiben átfogó és alapos vizsgálatokat végeztek egy hegedűkészítő mesterrel, és első megállapításuk idézte azt a már mások által is hangoztatott nézetet, miszerint „olyan (objektíven mérhető) eljárás, ami sikeresen meghatározza, definiálja egy hegedű hangzási minőségét, mindmáig nem létezik”. [8] Annak ellenére, hogy minden jelentős hegedűművész hajlamos rögtön eldönteni, hogy az a hegedű, amit kipróbál, antik vagy új darab-e, a szakirodalom kevés olyan jól felépített, ellenőrzött vizsgálatról számol be a fent nevezetten kívül, amely megbízható megkülönböztetést engedne régi olasz, francia vagy amerikai új hegedűk között, kizárólag a hangzásuk alapján.

Talán említést érdemel, pusztán az analógia okán, egy olyan borkóstolási kutatás, amiben a vizsgálóknak borkóstolás közben magmágneses rezonanciával (MRI) mérték az agyi aktivitását. Azt találták, hogy a borok közötti árfekvési különbséget kövölve, az alanyok arányosan fokozódó ízlevezetről számoltak be, egyidejűleg növekedett az agyuk megfelelő részében megfigyelhető élvezeti tapasztalat. Feltételezték, hogy hasonló érzések alakulhatnak ki akkor, amikor egy hegedűművész összehasonlítás céljából egy modern, újabb keletű, illetve egy sokmillió értékű Stradivarit szólaltat meg, illetve hasonlít össze.

Az ilyen és hasonló jelenségek elkerülésére, az említett kutatásban [6, 7] a vizsgálok 21 tapasztalt hegedűművész preferenciáit jó minőségű, új és válogatott régi olasz hegedűk (Stradivari és Guarneri del Gesù) virtuózok által megszólaltatott hangzása között kettős vak (double blind) körülmények között vizsgálták. A kettős vak vizsgálat azt jelenti, hogy sem az alanyok (jelen esetben a 21 hallgató), sem a megszólaltatók nem ismerték a megszólaltatott hegedűk eredetét, illetve a hallgatók nem ismerték a megszólaltató nevét. Az eredmények azt mutatták, hogy:

- a legjobban kedvelt hegedű egy újabb előállítású volt;
- a legkevésbé preferáltak egy Stradivari bizonyult;
- alacsony korrelációt találtak a hegedűk érzékelt hangzási minősége és kora, illetve pénzbeli értéke között;
- a hegedűművészek többsége képtelen volt meghatározni, hogy a hegedű, amit megszólaltatott, új vagy régi volt-e.

E megállapítások feltűnő kihívást, illetve illúziórombolást jelentenek a konvencionális hiedelmeknek, illetve mítoszoknak. A között szerzők [6, 7] arra hívják fel a figyelmet, hogy a Stradivari és más hegedűk hangzási „titkainak” a keresése helyett a jövő kutatóinak arra kellene fókuszálniuk, hogy a hegedűművészek metodikailag hogyan értékelik azokat a hangszereket, amelyeken a jellegzetes megszólaltatási kvalitások számukra a legfontosabbak, valamint arra, hogy ezek a kvalitások hogyan viszonyulnak az új vagy régi hangszerek gyártási jellegzetességeihez.

A fent leírt, új és klasszikus hegedűk hangjának nagyon új keletű (2012. évi) összehasonlítása mellett érdekessége miatt érdemes megemlíteni egy másik összehasonlítást, amelyet 1977-ben az angol BBC rádió kezdeményezett. Ennek során Isaac Stern és Pinchas Zuckerman világhírű hegedűművészeket és Charles Beare elismert angol hegedűkereskedőt felkérték, hogy hallgassanak és különböztessenek meg egy 1725-ben készített „Chacon” Stradivarit, egy 1739-ben alkotott Guarneri del Gesùt, egy 1846-ban készített Vuillaume-ot és Ronald Prail angol hegedűkészítő mester 1970-es években készült új hegedűjét. Sternnek és Zuckermannak lehetővé tették a hegedűk hosszas tanulmányozását és megszólaltatását. Ezután egy függöny mögött Hamong Parikian hegedűvirtuóz eljátszotta Bruch G-moll hegedűversenyét, valamint egy részletet J. S. Bach Chaconne-jából. Stern, Zuckermant és Beare-t megkérték, hogy azonosítsák a négy hegedűt. Az eredmény ezúttal is mítoszromboló volt: a vitathatatlanul kompetens döntnökök egyike sem tudott helyesen azonosítani kettőnél többet a négy hegedűből, és közülük ketten Stradivari-ként jelölték meg az új hangszert. [9] Hegedűit Stradivari természetesen nem klónként alkotta, ezért a már említett, ma is meglévő 650 darab között vannak jobban, illetve kevésbé jól sikerült darabok is. Hogy melyik milyen, mint láttuk, még mindig szubjektív megítélés kérdése, és az idők folyamán a besorolásban, illetve főként az értékítéletben lehetnek változások. A valóság az, hogy a nagy hegedűvirtuózok némelyike olyan érzelmi kapcsolatot alakított ki Stradivarijához, amit semmilyen objektívnek feltételezett tudományos elemzés vagy vizsgálat sem tudott ellensúlyozni.

**A második mítosz** lényegében arra vonatkozik, hogy a Stradivari és a velük egy korban készített klasszikus hegedűk egyedülálló hangzási minősége a készítési eljárásnál igénybe vett egyedi tényezőknek, illetve a felhasznált anyagok különlegességének tulajdonítható. Ezek elsősorban a faanyag tulajdonságai, különösképpen annak fajtája, helyi (földrajzi) eredete, fajsúlya, illetve lapvastagsága, a lakkozáshoz használt gyanták jellemzői, a faanyag kémiai vagy újabban más, például biotechnológiai előkezeléséből eredő sajátosságok. Az így nyert eredményekre alapozva számos próbálkozás történt a klasszikus hegedűk hangzási minőségével felérő új hegedűk készítésére is. Hegedűihez, különböző szerzők szerint, Stradivari nagy gondnal válogatott alpesi lucfenyőt, boszniai juhart, erdei fenyőt, paliszandert, illetve bukszust használt, sőt állítólag azóta kihalt fafajtákat is. Kémiai szempontból a fa három polimerből, azaz cellulózból, hemicellulózból és ligninből álló, méhsejtszerű kompozit anyag, aminek mechanikai tulajdonságai (rugalmasság, keménység stb.) nemcsak a fafajta típusának, hanem azoknak a klimatikus, időjárárszerű körülményeknek függvényei, amelyeknek a fa növekedése közben ki volt téve. Amikor a fák körmérete tavasszal növekedésnek indul, a képződő sejtek rövidek, vékony falúak és nagy a belső átmérőjük a vízkeringés elősegítése érdekében (korai fa, **2. ábra**, bal oldal). A kései fát a hosszú, keskeny sejtek jellemzik, amelyekben a sejtfal lamellái (L) és egy másodlagos, szekunder fal (SW) a fa megerősítését szolgálják (**2. ábra**, jobb oldal). Ha növekedés közben a nyár hideg és nedves, a képződő évgyűrűk keskenyek, és főleg nagy belső átmérőjű, vékony másodlagos falú korai-fa-sejtekből állnak. A Stradivari által gondosan válogatott faanyag olyan hosszabb időszakban nőtt (1650–1715) fákból eredt, amelyek alacsony nyári hőmérsékletek idején nö-

## Mítoszrombolás hegedűvel

vekedtek. Ezt a Maundes-minimumnak [10] is nevezett időjárási periódust minimális napfolttevékenység jellemezte. Az ekkor képződött enyhe növekedésű kései fa (latewood) keskeny növekedési gyűrűket eredményezett, ezáltal a faanyag rendkívül rugalmassá és könnyűvé vált. Ezek lényegében a kiváló rezgési jellemzők előfeltételei. [12]

A hegedűkészítéshez használt faanyagok fajsúlyvizsgálatára újabban a legkorszerűbb műszeres anyagvizsgálati módszereket is igénybe vették. Így például 2008-ban egy nagyon alapos tanulmány során a klasszikus cremonai és modern hegedűk összehasonlító vizsgálatára az orvostudományban gyakorta használt komputertomográfiát alkalmazták (3. ábra). [13] E vizsgálat részletezésére itt sem hely, sem lehetőség nincs, de a 4. ábrán bemutatunk egy CT-vel végzett fajsúlyvizsgálati térképet. A kimutatott fajsúlykülönbségek a szerzők szerint magyarázhatják a klasszikus és új hegedűk közötti hangzáskülönbségeket, amit a használt fafajták előkezelésének tulajdonítottak. E téren többféle előkezelést is feltételeztek a cremonai mesterek részéről, de ennek megfelelően dokumentált feljegyzése nincsen. Arra viszont utaltak, hogy az úgynevezett „tócsásítás” (poldering), azaz a faanyag vízsugárral való kezelése befolyásolhatta az abból előállított hegedűk hangzását. [14] Egy másik, „gőzölésnek” (stewing) nevezett eljárás is szerepet játszhatott, amely a hemicellulózt oldotta ki a faanyagok előkezelésekor. Az előkezelés során mikrobákat, enzimeket, füstölő salétromsavat, illetve ammóniát is használhattak a klasszikus hegedűkészítők a faanyagok fajsúlykülönbségének előidézésére. [15]

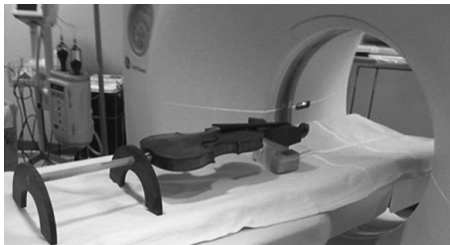
A washingtoni Kongresszusi Könyvtár tulajdonában lévő világhírű, 307 éves „Betts” elnevezésű Stradivari-hegedű komputertomográfiai vizsgálata alapján egy amatőr hegedűművész röntgenszakorvos (CT-szakértő), egy hegedűművész és egy hegedűkészítő mester elkészítette a „Betts” pontos replikáját és azt nagy sikerrel mutatták be 2011-ben a hegedűkészítők ohiói kiállításán. [16]

A felhasznált faanyagok elemzése mellett a másik kémiai vizsgálat a hangszerek lakkozását érintette. Ezt azért is kell hangsúlyozni, mert mindkét módszer egyik jeles apostola egy magyar származású texasi vegyészprofesszor, Joseph (József) Nagyváry. [16] Saját és mások kutatásai alapján Nagyváry hegedűket is készített, és ezeken világhírű virtuózok, többek között Yehudi Menuhin és Itzhak Perlman is játszottak, összehasonlítva azok hangjait a híres cremonai eredetű hegedűkkel. Ez annyira sikeresnek bizonyult, hogy a „Stradivarius” hegedűk mintájára „Nagyvarius”-okat is emlegettek (5. ábra).

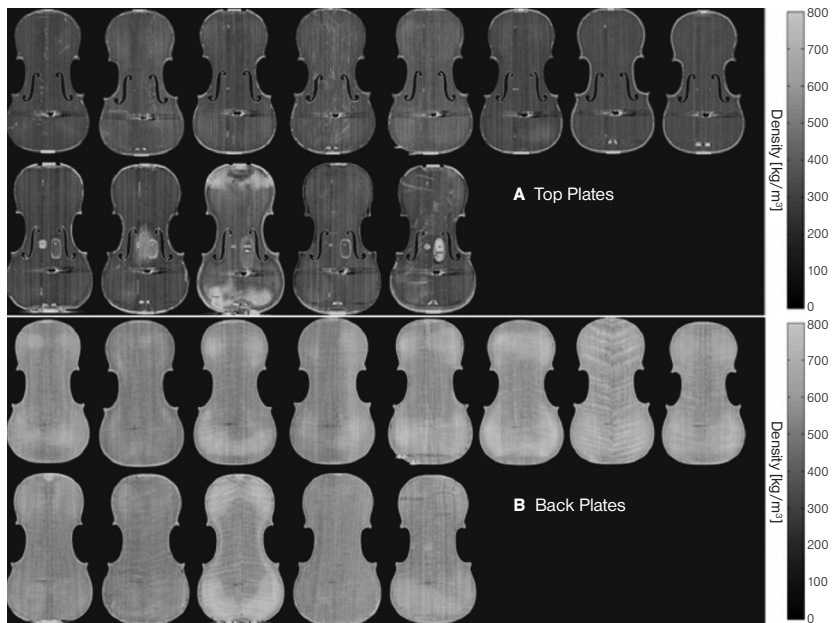
Hegedűinek lakkozásához, a világszerte keringő legendák és mítoszok szerint, Stradivari szigorúan titkos receptúrákat használt, amelyek között annyira titkosak is voltak, hogy pontos összetételüket maga a mester sem ismerte. Ezeket állítólag helyi patikusoktól szerezte be, akik – a mesterrel ellentétben – kiismerték magukat a receptekben, és az azóta azonosított lakk adalékanyagok, például a poliszaharidok és a bórax használatával tisztában voltak. De a mester is tudta talán, hogy a bórax a cukormolekulákat hálózattá alakíthatja és ezen felül fakárosító élősködők ellen is véd. Mulattató az a hiedelem, ami szerint szűzlány-vizelet is a lakkok fontos komponense volt.

Nagyváryhoz visszatérve, ő a budapesti ELTE-n végezte kémiai tanulmányait 1952 és 1956 között, majd Zürichben természetes anyagok kémiájából doktorált Paul Karrer Nobel-díjas kutató-intézetében. Zürichben kezdett el hegedűlecekét venni egy

3. ábra. Hegedűvizsgálat CT-vel [13]



5. ábra. Nagyváry (Nagyvariusszal) és Zina Schiff hegedűművész (Stradivariusszal) a texasi A&M Egyetemen rendezett, 25 évi Stradivarius-kutatást ünneplő rendezvényen, ahol sikeresen összehasonlították a két hangszert



4. ábra. Hegedűelőlap (felső két sor) és -hátlap (alsó két sor) CT-vel végzett fajsúlyvizsgálata. A skálán kg/m<sup>3</sup> értékek szerepelnek. Felső sor: modern hegedűk, alsó sor: klasszikus cremonai hegedűk



## Mítoszrombolás hegedűvel

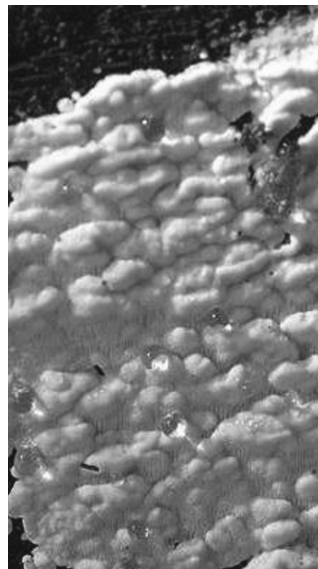
olyan hegedűn, ami valaha Albert Einstein tulajdonát képezte. 1963-ban Nagyváry egyéves posztdoktori időszakot töltött Lord Alexander Todd angol Nobel-díjas laboratóriumában, majd 1964-ben kivándorolt az Egyesült Államokba és a texasi A&M Egyetem biokémia- és biofizikaprofesszora lett. Ezt a pozíciót 2003-ig, nyugdíjazásáig töltötte be. [17] Számos közleménye jelent meg a Stradivari-hegedűk kémiaiáról, és e témáról több mint 255 előadást tartott szerte a világon, így ő volt a fő előadója Tokióban, a fizika évében megrendezett Einstein-centenáriumnak. Ezen az eseményen mutatták be és értékelték Mariko Senju hegedűvirtuóz játékát egy Nagyváry által készített hegedűn. Ebből az alkalomból Nagyváry professzor megkapta a Japán Fizikai Társaság aranymedálját a régi olasz hegedűk mikro- és nanokompozit-összetételével kapcsolatos felfedezéseiért.

Az A&M Egyetemen a Nagyváry által vezetett kutatócsoport magmágneses rezonanciával (NMR), infravörös (FTIR), energiadisziperzív spektroszkópiával (EDS) és  $^{13}\text{C}$ -szilárdtest-magmágneses rezonanciával (NMR) vizsgálta régi és mai hangszerek faanyagának kémiai összetételét. A modern hegedűkből vett faforgácsokat összehasonították több, 1770-es évekből származó hegedű javításakor, illetve restaurálásakor keletkezett faforgáccsal. Ugyancsak elemezték a forgácsok elégetésekor keletkezett hamu összetételét és a mintákban mikro- és nanokompozit-összetételeket azonosítottak. Említésre érdemes, hogy amikor az eredményeit leíró cikket Nagyváry 1987-ben publikálásra küldte a *Nature* című folyóirathoz, a közlést a bírálók visszautasították. Ezért eredményei csak két évvel később láthatnak napvilágot a *Chemical and Engineering News* című folyóiratban [18] és 1996-ban a *The Chemical Intelligencer* című, időközben megszűnt folyóiratban. [19]

Végül 2006-ban a *Nature* [20] is már hajlandónak mutatkozott publikálni Nagyváry eredményeit. A közleményekben megerősödött az a meggyőződés, hogy a Stradivari-hegedűk egyedi hangzási minőségét a felhasznált faanyagok, a kémiai kezelések döntően befolyásolták, ugyanis olyan vegyületek, mint például a  $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$  és  $\text{ZrSiO}_4$  nem képezték részét a faanyagok eredeti összetételének. Tudomásunk szerinti utolsó, 2009. évi közleményében [21] Nagyváry kifejtette, hogy eredményei megmagyarázzák, miért fulladtak eleinte kudarcba mindazok a próbálkozások, amelyek a Stradivariusok minőségével vetekedő modern hegedűk készítését célozták. Valószínűleg itthon még az is érdeklődésre számíthat, hogy 1988-ban Texas állam törvénykezése 275 000 dollárt bocsátott Nagyváry rendelkezésére egy új üzleti tevékenységhez, azzal a céllal, hogy Texast – a 16. századi Cremonához hasonlóan – a 20. század hegedűkészítő fővárosává tegye. [22]

A klasszikus és modern hegedűk hangzásához, akusztikai tulajdonságaihoz kémiai szempontból jelentős módon hozzájáruló tényezők között feltétlenül említést érdemelnek a lakkozásához használt anyagok összetételei és tulajdonságai. Egyesek Stradivari lakkjainak csaknem természetfölötti jelentőséget tulajdonítottak, hiszen a korabeli készítmények mindig családi titoknak számítottak. Ezért sokan a lakkokat, illetve a lakkozást tekintették egy Stradivari igazi titkának. Az összetétel felderítésére tett 1902-es erőfeszítéseket egy könyvben [23] is leírták. Ebben három olyan tényezőt azonosítottak, amely a hegedű hangminőségét jellemzi, ezek a felhasznált faanyagok, a méretezés és a lakkok. Jelentős terjedelemben ismertették, hogy a lakk volt a legfontosabb és a faanyag minősége a legkevésbé fontos tényező. Mai szakértők túlzottnak tartják a lakk minőségének szerepét, mivel minden lakkozás súlynövekedéssel és az ezt kísérő rezgéscsillapítással jár. Ez lehet az oka annak, hogy középkori lantkészítők csak részlegesen lakkozták hangszereiket, és ezért ajánlják, hogy különösen a hegedűk felső lapját a lehető legvékonyabban lakkozzák. Ugyanakkor a lakkozásnak van értelme. A sima fényes lakkréteg egyrészt véd a szennyezések ellen, másrészt lehetővé teszi a szabad szemmel is látható repedések feltöltését. Végül a lakkozás vonzóbbá teszi a hegedűt azáltal, hogy a tiszta, fényes lakk kiemeli a fa erezését.

Egy nagyon alapos vizsgálat során a párizsi zenetudományi múzeum Stradivari-gyűjteményéből származó tucatnyi Amati-, Guarneri- és Stradivari-hegedűben is keresték a Stradivari-hegedűk titkát. Öt Stradivari-lakk közül négy magas ólomtartalommal rendelkezett. Ez az olajkence vitathatatlan jelenlétét mutatta, mivel a lenmag- és dióolaj-alapú kencéknek hosszú a száradási ideje, amit egy szárító vegyület hozzáadásával csökkenteni lehet. A leggyakoribb szárító az ólom-oxid ( $\text{PbO}$ ), mert szárító jellege mellett gyakran pigmentként is használják. A leírt nagyon nagy számú lakkösszetétel gyaníthatóvá teszi, hogy Stradivari egy lakkforgalmazótól rendelte meg kencéit és csak a megrendelő kívánságától függő színárnyalatot jelezte. Feltételezik, hogy a felhasznált kencék összetétele nem különbözött jelentősen a ma használt kencékétől. [24]



6. ábra. *Physisporinus vitreus* (felül) és *Xylaria longipes* (alul) gombafajták

7. ábra. Mycowood (gombával kezelt fából készült) hegedűk – a humor oldaláról [28]



## Mítoszrombolás hegedűvel

A korszerű műszerek felhasználására vonatkozóan még érdemes megemlíteni, hogy Franco Zanini olasz fizikus és a műkedvelő hegedűs, a trieszti Elettra szinkrotron-laboratóriumban szinkrotron-felvételekkel kísérte meg, hogy betekintszen a klasszikus hegedűk lakkrétegei mögé. Véleménye szerint a hangszerek kiváló akusztikai kvalitásai a felület mikrorepedéseinek és tökéletlenségeinek tulajdoníthatók.

Az előbbiekben már említésre került a Stradivari- és más klasszikus hegedűk építéséhez használt fafajták jelentősége, és felsoroltuk azokat a fafajtákat, amelyeket maga Stradivari használt. Ott is említettük azt a feltételezést, amely szerint az azokból a fafajtákból készült hegedűk azért számítanak a legjobbnak, mert Stradivari az 1645 és 1715 között nőtt fákat használta. Akkoriban hűvösesek voltak a nyarak és hosszúak a telek, ami jelentősen használt a fák anyagának. Mint már leírtuk, az alacsony fajsúly, a nagy sebességű hangáthaladás és a nagy rugalmassági együttható képezik a hegedűkészítéshez ideális faanyag legszükségesebb tulajdonságait.

A Stradivari-mítoszok és -titkok megfejtésének területén talán az egyik legérdekesebb és legutolsó eredmény a biotechnológiához kötődik. Egy speciális biotechnológiai eljárásnak köszönhetően ugyanis úgy tudják kezelni a fát, hogy ugyanolyan vagy jobb hangzási minőségű hegedűt készítenek belőle, mint egy legjobbnak tartott Stradivari. A svájci St. Gallen Szövetségi Anyagvizsgálati és Kutatólaboratóriumok (EMPA) Favédelmi és Biotechnológiai Osztálya kutatói által felfedezett gombák úgy alakítják át a velük kezelt faanyagok akusztikáját, mintha azok Stradivari korában nőttek volna, azaz a fa szerkezetét ritkítják, fajsúlyát csökkentik, a hangok fán belüli terjedési sebességét pedig növelik. Az elsőre az eddigi gombák is képesek, azonban a fajsúly csökkentésével lelassítják a hangok terjedését, ami kifejezetten előnytelen egy hegedű esetében.

A svájci kutatók [26] két olyan gombafajtát találtak, a *Physisporinus vitreus* és a *Xylaria longipest* (**6. ábra**), amelyekkel a norvég lucfenyőt és a nyugati platánt kezelve a faanyagok a fenti követelményeknek messzemenően eleget tesznek. Ezeket a gombákat *mycowood* névvel is illetik. A kezelt faanyagokból készült hegedűket a már szintén említett hegedűvirtuózokkal elvégzett hangzás-vaktesztnek vetették alá. Az eredmények azt mutatták, hogy a gombakezelt famintákból készült hegedűt nem lehetett megkülönböztetni egy klasszikus Stradivaritól. Ezeket a svájci eredményeket világszerte annyira eredetieknek és sikeresnek tekintették, hogy humoros illusztrálásukra karikatúra is született (**7. ábra**). [28]

## Zárszó

Mint láttuk, a Stradivari- és más klasszikus, valamint új hegedűk hangzásáról, építéséről, akusztikájáról, kémiaiájáról és biotechnológiájáról rendkívül érdekes, alapos és hasznos eredményt tud felmutatni a tudományos kutatás. Ha ezek után feltesszük a kérdést, hogy ezek mítoszt romboltak-e, vagy fennmaradtak-e, élnek-e ma is a Stradivari-mítoszok, akkor a válasz csak egy lehet: igen, élnek. Az ehhez a megállapításhoz tartozó érvekkel Dunát lehetne rekeszteni, de a lényeg röviden kifejezhető. A hegedűk akusztikai hangszerek, és azok hangzását szubjektív tényezők alapján értékelik. Az emberi hangészlelés, annak egzakt mérési és összehasonlítási lehetőségeinek korlátozottsága miatt ma még lehetetlen, s az objektív összehasonlítás valószínűleg lehetetlen is marad az emberi sznobizmus folytán addig, míg ember él ezen a sárteken.

## IRODALOM

- [1] Szántó György, Stadivari, Mundus, Budapest, 2006.
- [2] <http://moly.hu/konyvek/szanto-gyorgy-stradivari>
- [3] W. H. Hill, A. F. Hill, A. E. Hill, Antonio Stradivari, His life and work, Dover Publications, New York, 1902.
- [4] Bakos Ferenc, Idegen szavak és kifejezések szótára, Akadémiai Kiadó, 2005.
- [5] Prof. Dr. Karl Fuhr, Die akustischen Rätsel der Geige, Carl Merseburger, Leipzig, 1926. <http://mek.oszk.hu/06900/06954/html/>
- [6] C. Saitis, C. Fritz, C. Gustavino, B. L. Giordano, G. P. Scavone, Investigating consistency in verbal descriptions of violin preference by experienced players, Proc. Int. Conf. on Music Perception, July 23–28, 2012, Thessaloniki, Greece, 2012.
- [7] C. Fritz, J. Curtin, J. Poitevineo, P. Morrel-Sammels, Fan-Chia Tao, Player preferences among new and old violins, PNAS (2012) 109, 760.
- [8] G. Weinreich, What science knows about violins, and what it does not know, Am. J. Phys. (1993) 61, 1067.
- [9] <http://abcviolins.com.au/blind-listening-tests>
- [10] L. Burckle, H. D. Grissino-Mayer, Stradivari, violins, tree rings, and the Maundes Minimum: a hypothesis, Dendrochronologia (2003) 21, 41.
- [11] <http://blogs.discovermagazine.com/notrockscience/2012/01/02/violinists-cant-tell-the-difference-between-stradivarius-violins-and-new-ones/#.URixXx12QnE>
- [12] [http://www.chemistryviews.org/details/ezine/2067505/Chemical\\_Secrets\\_of\\_the\\_Violin\\_Virtuosi\\_Part\\_2.html](http://www.chemistryviews.org/details/ezine/2067505/Chemical_Secrets_of_the_Violin_Virtuosi_Part_2.html)
- [13] B. C. Stoel, T. M. Borman, A comparison of wood density between classical Cremonese and modern violins, PLoS One (2008), 3 July, doi: 10.1371/journal.pone.0002554
- [14] V. Bucur, Acoustics of wood, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [15] K. Erikson, R. A. Blanchette, P. Ander, Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components, Springer, New York, 1990.
- [16] <http://waddleviolins.com/index.php?contentID=86> [17] <http://www.nagyvaryviolins.com/bio.html>
- [18] J. Nagyvary, The chemistry of Stradivarius, Chem. Eng. News (1988) May 23.
- [19] J. Nagyvary, Modern science and the classical violin. A view from Academia, The Chemical Intelligencer (1996) January.
- [20] J. Nagyvary, J. A. DiVerdi, N. L. Owen, H. D. Tolley, Wood used by Stradivari and Guarneri. The material used by the old masters to make exquisite violins may have been chemically manipulated, Nature (2006) 444, 565.
- [21] J. Nagyvary, R. M. Guillemet, C. H. Spiegelman, Mineral preservatives in the wood of Stradivari and Guarneri, PLoS One (2009) 4, 1.
- [22] [http://flatrock.org.nz/topics/society\\_culture/fiddling\\_around\\_the\\_lab.htm](http://flatrock.org.nz/topics/society_culture/fiddling_around_the_lab.htm)
- [23] [http://www.chemistryviews.org/details/ezine/2058533/Chemical\\_Secrets\\_of\\_the\\_Violin\\_Virtuosi\\_Part\\_1.html](http://www.chemistryviews.org/details/ezine/2058533/Chemical_Secrets_of_the_Violin_Virtuosi_Part_1.html)
- [24] <http://www.telegraph.co.uk/science/science-news/9716271/The-secret-behind-a-Stradivarius-imperfection.html>
- [25] <http://www.sciencedaily.com/releases/2012/09/120908081611.htm>
- [26] F.W.M.R. Scharze, M. Spycher, S. Fink, Superior wood for violins. Food decay fungi as a substitute for cold climate, New Phytologist (2006) 179, 1095.
- [27] <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2200666/Treating-modern-violins-fungi-makes-sound-like-rare-Stradivarius.html>
- [28] <http://www.economist.com/node/21563276/print>

# Publikálj vagy pusztulj, a napos oldalról

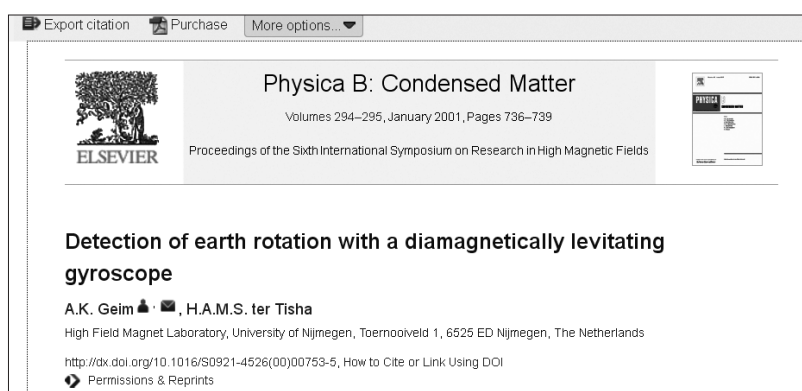
A „publikálj vagy pusztulj” az angol eredetiben „publish or perish”, vagy radikálisabban „publikálj és pusztulj” („publish and perish”) blickfangos szlogen ugyan gyakran közelebb áll a szellemeskedéshez, mint a hatásos óva intéshez, de hasznosan mutat rá a tudományos publikálás manapság megnyilvánuló sokdimenzionális vadhajlásaira is, nevezetesen arra, hogy mostanában a szakirodalomban bizonyos erőfeszítéssel minden zöldséget vagy badarságot le lehet publikálni [1-3].

Jelen írás arra szeretne rámutatni, hogy a fentieket minden negatív vonzatuk ellenére meg lehet közelíteni egy másik – nevezük kedves – oldalról is, aminek adódhatnak olyan derűs aspektusai, amelyek ugyan eltérnek a „szabályos” tudományos kutatás és publikálás köznapi várakozásaitól, szokásaitól, de valós, a tudományos ismeretek fejlődéséhez is jelentősen hozzájáruló kutatási eredményekről számolnak be.

## H.A.M.S.ter Tisha, „a föld forgásának diamágneses giroszkóppal kimutatott lebegtetése” című tudományos cikk társszerzője

Persze, a nagyobb hatás kedvéért lehetne csűrni-csavarni a tényeket, de valószínűleg jobbnak látszik már az elején lelőni a poént [4]. Ugyanis a fent említett H.A.M.S.ter a betűket összeolvasva az angol szövegben: „hamster”-t, azaz a valóságban egy kedves kis hörcsögöt takar. Bár az állatka neve ott szerepel a közlemény fejlécén (1. ábra), ő nem annyira a leírt kísérlet (társ)-szerzője, hanem a valóságban valószínűleg az alanya is volt. A közlemény fő szerzője a leírt kísérletekkel és a kis hörcsög lebegtetésével azt kívánta bizonyítani, hogy erős mágneses mezők lehetővé teszik valójában nem mágneses anyagok levitációját kis, de nem elhanyagolható, körülbelül 10–5 egységnyi diamágnesességük folytán. A diamágneses erő éppen úgy minden atomra és molekulára hat, mint a súlyerő, és képes kiegyenlíteni azt, következésképpen felhasználható olyan folyamatos súlytalansági környezet megvalósítására, ami különben csak űrállomások fedélzetén érhető el. A dolgozat egy műanyag gömb lebegtetéséről és forgásáról szól, rendkívüli, 15 tesla erősségű mágneses mezőben, ami biztosítja a nehézségi erő kiegyenlítését. A súrlódás hiányában forgó golyó giroszkópként működik, és a Foucault-ingához hasonlóan mutatja a Föld abszolút forgását. az eszköz hozzásegíthet olyan precíziós keringő giroszkópok kifejlesztéséhez, amelyek lehetővé tehetik az általános relativitás elméletének tesztelését [4]. Ezek után nyugodtan rátérhetünk a fenti tudományos cikk fő szerzőjére annál is inkább, mert ő nem más, mint a volt Szovjetunióban született, de onnan elszármazott André Konstantin Geim. A ma még mindig csak 54 éves Geimről, amennyiben nem mindenki ismeri fel első olvasásra, rengeteg sok mindent lehetne megemlíteni, de egyelőre elégedjünk meg azzal, hogy szintén a volt Szovjetunióból elszármazott Konstantin Novoselovval együtt megkapta a 2010. évi fizikai Nobel-díjat a grafitből származó, két-dimenziós grafénnel kapcsolatos úttörő kutatásaiért. Geimről kutatásai révén és Nobel-díja kapcsán rengetegen és rengeteget írtak [5]. Itt csak azt a jellemvonását említenénk meg, amelyre jelen szerző tudomása szerint nem tértek ki eddig mások. Sajnos, nem volt lehetőségünk André Geimet (hogy pontosak legyünk, az angliai Manchesterben élő Sir André Geimet, mert azóta II. Erzsé-

1. ábra. A lebegtetési folyóiratcikk „fejléce”



2. ábra. André Geim a Harvard Egyetemen átveszi a 2000. évi fizikai IgNobel-díjat





bet lovaggá ütötte) személyesen megismerni, és valószínűleg a jövőben sem lesz, de a huncutságát külön ki szeretnénk emelni. Értelmező szótári vonatkozásban a huncutság pozitív oldalról tekintve csalafintaságot, pajkosságot és hamiskasságot jelenthet. Nemcsak a Tisha hörcsög levitációjából eredendően, amiből szerző nyugodtan posztulálhatja, hogy André Geim huncut lény. Aki az ilyen ragyogó, ám huncut ötletet kiigyalja, az csak az lehet.

És hogy ezt további érvek is alátámasszák, említésre érdemes, hogy Geim 2001-ben, akkor a hollandiai Nijmegeni Egyetem kutatójaként, mágneses lebegtetéssel foglalkozva már lebegtetett egy szintén kis állatot, egy tavi békát, igaz, nem levegőben, hanem egy vízzel töltött, zárt edényben. A béka lebegtetését az olvasó számítógépén megtekintheti a [6] hivatkozásbeli linken. Igaz, hogy az akkori eredményeit leíró tudományos cikkének nem a kis béka, hanem Michael Berry angol kutató volt a szerzőtársa [7], de ezért a munkájukért Berry és Geim közösen megkapták az amerikai fizikai IgNobel-díjat (**2. ábra**). Nem ez a hely az, ahol erről a díjról részletesen kellene írunk, de annyit megemlítünk, hogy az amerikai Marc Abrahams által létesített és évente számos tudományterületen, ugyancsak ünnepélyes körülmények között, gyakran stockholmi Nobel-díjasok által átadott díjat az „igazi” Nobel-díjak pozitív paródiájaként olyan komoly folyóiratokban publikált tudományos kutatásokért adják, amelyek az olvasót előbb nevetésre, majd gondolkodásra készítetik [8].

### Linus Hovmöller Zou, a „Pszeudodekagonális approximánsok szerkezete Al-Co-Ni-ben” című tudományos cikk egyik társszerzője

Az említettek után nem lesz meglepő annak hangsúlyozása, hogy a fenti, rendkívül tekintélyes, komoly tudományos folyóiratban megjelent cikk (**3. ábra**, [10]) egyik társszerzője, nevezetesen Linus Hovmöller Zou nem őszbecsavarodott hajú tapasztalt kutató, sem doktoráns, vagy posztdoktoráns, hanem egy 11 éves svéd kislány (**4. ábra**). Különben azt is érdemes megjegyezni, hogy Linus az Angol Királyi Tudományos Társaság (Royal Society) folyóirata eddigi 352 évének legifjabb tudományos cikkszerzője.

Sven Hovmöller, Linus édesapja svéd szerkezetkémikus, zsenge ifjúkora óta két vonzalomnak hódolt. Az egyik Kína és annak főleg jelenkori történelme, beleértve a nagy kínai kulturális forradalmat és az 1968. évi diákfelkelést, a másik, szűkebb szakterülete az olyan anyagok szerkezete, amiket később Dan Shechtman izraeli metallográfus nehezen kiharcolt és végül Nobel-díjjal is elismert felfedezéseként [11] kvázikristályokként fogadott el a világ. 1984-ben vette fel laboratóriumába első kínai PhD-hallgatóját. Akkor nyilatkozta, hogy tapasztalata szerint azok a kínai doktoránsok, akiket onnan kiengednek külföldre, különlegesen tehetségesek [12].

1987-ben fogadta be laboratóriumába PhD-ként a kínai Xiaodong Zout, akit később feleségül vett, és akivel azóta két kislány büszke szülei. Maga Xiaodong is elismert kutató és az e fejezet tárgyát képező tudományos cikknek szintén társszerzője (**3. ábra**).

Kutatásaiban Sven Hovmöller körülbelül 25 éve foglalkozott olyan együttesek szerkezetével, amiket 1984-től kvázikristályoknak neveznek. Ezek aperiodikus szerkezetek, amelyek nem mutatnak olyan ismétlődő kristályos jeleket, mint például a nátrium-klorid. Hovmöller figyelme elsősorban az alumínium-kobalt-nikkel (Al-Co-Ni) rendszerre irányult, de különösen azok approximánsaira, azaz olyanokra, amik tőlük atomi elhelyezkedést illetően csak egy vagy két százalékban különböznek, de atomi elhelyezkedésük nyomonkövethetőbb. Ez irányú érdeklődése onnan eredt, hogy egy konferencia-poszteren meglátott egy elektromágneses diffrakciós spektroszkópiai felvételt egy Al-Co-Ni approximánssról.

A felvételt annyira szépnek találta, hogy azt hitte, otthon majd gyorsan és egyszerűen megfejtetheti. Ennek értelmében meghívta a német Markus Döbblingert, a felvétel készítőjét, hogy végezzen posztdoktorális kutatást svédországi laboratóriumában. Azonban több hónapos munka és számos újabb elektronmikroszkópos felvétel után a Hovmöller-Döblinger kettős jöttányit sem tudott előrehaladni a szerkezet megfejtésében. Sőt, mások, akiket erre felkértek, sem tudtak segíteni. Döblinger időközben állást vállalt a Münchener Egyetemen. De Hovmöllert évekig nem hagyta nyugodni az Al-Co-Ni szerkezet. Aztán váratlanul fiára, Li-

3. ábra. A folyóiratcikk fejléce, ahol Linus Hovmöller Zou az egyik társszerző [10]



4. ábra. Linus Hovmöller Zou, a 11 éves társszerző





5. ábra. Apa és fia (Sven és Linus) munka közben



7. ábra A Blackawton-iskolások egy csoportja kutatás közben [19]

nusra gondolt: okos, talpraesett fiú, talán ő segíteni tud. Ösztökölte erre valószínűleg az is, hogy tudta, Linus nagyon ügyes a „sudoku” nevű játékban. A sudoku japán szó, bár a játék nem onnan származik.

1783-ban Leonhard Euler svájci matematikus fektette le a játék alapjául szolgáló elméletet, amely arról szólt, hogy egy tetszőleges számsorban és számoszlopban úgy kellett elhelyezni a számokat, hogy adott oszlopban és sorban azok ne ismétlődjenek [14].

Apa és fia a konyhaasztalhoz ültek (5. ábra) és két napon át több tucat, Döblinger által felvett elektronmikroszkóp-felvételt néztek át, azokat elektrondiffrakciós felvételekkel is kiegészítve, az Al-Co-Ni szerkezet atomi pozíciójának tisztázása érdekében. Sven közben igyekezett fiának megmagyarázni, hogy a felvételek hogyan illenek össze, és amikor Linus nem értette, a magyarázatot megismételte. Két nap alatt Linus aktív közreműködésével négy új szerkezetet sikerült összerakniuk [13].

Linusnak fogalma sem volt kémiáról vagy fizikáról, és a tudományos kutatásról is csak annyit tudott, hogy szülei azzal foglalkoznak. Sven több sajtótájékoztatón nyilatkozta, hogy fiát nem tekinti csodagyerekeknek és nem is úgy neveeli. Linus egyszerűen jó eszű, okos és talpraesett kisfiú, aki olyan összefüggéseket is észrevett, amiket mások nem [10].

## A „Blackawton bees” című tudományos cikk 25 társszerzője

A fent említett cikk a Biological Letters, Animal Behaviour című folyóiratban jelent meg 2010-ben (6. ábra [15]). Szerzői és a cikkben leírt kutatások megtervezői és végzői közül 25-en az angliai Devon tartomány Blackawton városkájának 8–10 éves elemi iskolásai (7. ábra). A többiek a gyerekek oktatói és az egyik iskolás idegkutató édesapja.

6. ábra. A dongókutatót leíró folyóiratcikk fejléce és a kutatás tárgya

**biology**  
**letters**  
 Animal behaviour

*Biol. Lett.*  
 doi:10.1098/rsbl.2010.1056  
 Published online

## Blackawton bees

**P. S. Blackawton<sup>1</sup>, S. Airzee<sup>1</sup>, A. Allen<sup>1</sup>, S. Baker<sup>1</sup>,  
 A. Berrow<sup>1</sup>, C. Blair<sup>1</sup>, M. Churchill<sup>1</sup>, J. Coles<sup>1</sup>, R. F.-  
 J. Cumming<sup>1</sup>, L. Fraquelli<sup>1</sup>, C. Hackford<sup>1</sup>, A. Hinton  
 Mellor<sup>1</sup>, M. Hutchcroft<sup>1</sup>, B. Ireland<sup>1</sup>, D. Jewsbury<sup>1</sup>,  
 A. Littlejohns<sup>1</sup>, G. M. Littlejohns<sup>1</sup>, M. Lotto<sup>1</sup>,  
 J. McKeown<sup>1</sup>, A. O'Toole<sup>1</sup>, H. Richards<sup>1</sup>,  
 L. Robbins-Davey<sup>1</sup>, S. Roblyn<sup>1</sup>, H. Rodwell-Lynn<sup>1</sup>,  
 D. Schenck<sup>1</sup>, J. Springer<sup>1</sup>, A. Wishy<sup>1</sup>,  
 T. Rodwell-Lynn<sup>1</sup>, D. Strudwick<sup>1</sup> and R. B. Lotto<sup>2,\*</sup>**

<sup>1</sup>Blackawton Primary School, Blackawton, Devon, UK  
<sup>2</sup>Institute of Ophthalmology, University College London,  
 11-43 Bath Street, London EC1V 9EL, UK  
 \*Author for correspondence (lotto@ucl.ac.uk).

8. ábra. Poszméh (Bombus terrestris)





*Publikálj vagy pusztulj, a napos oldalról*

A kutatás alanyai a poszméhek (*Bombus terrestris*, **8. ábra**), illetve azok viselkedése. A kutatás a *Bombus terrestris* szín- és mintalátásával és annak eredetével foglalkozott. Jól bevált, előzőleg kidolgozott, illetve feltalált experimentális eljárások [14], amiket egy Nobel-díjjal elismert kutatás is megalapozott [17], igazolták, hogy a poszméhek akkor is képesek a tanult színek, minták és térbeli utasítások kezelésére, amikor változásokkal találkoznak egy színes terepen [18].

A gyerekek kutatásában és a cikkben az volt az újdonság, hogy a dongók szín- és mintautasításokat is megtanultak két szín-ből álló helyi és globális mintákban egy térbeli komplex terepen. A kis és nagy térbeli skálán tanulmányozott színes mintafelismerések ritkán vizsgált témának számítanak, és az, hogy a rovarok hogyan ismerik fel a színes mintázatokat és helyszíneket, kevésbé ismert a rovarkutatásban.

A gyerekkort jellemző kielégíthetetlen kíváncsiság a megtanított tudományos metodika szkepticizmusával kiegészítve lehetővé tette a fentiek megvalósítását. A leírtak tudományos felügyeletét, illetve valószínűleg az ötletgazda szerepét Bean Lotto művész és idegkutató, az egyik kisgyerek édesapja (University College, London) látta el [20].

## Végszó

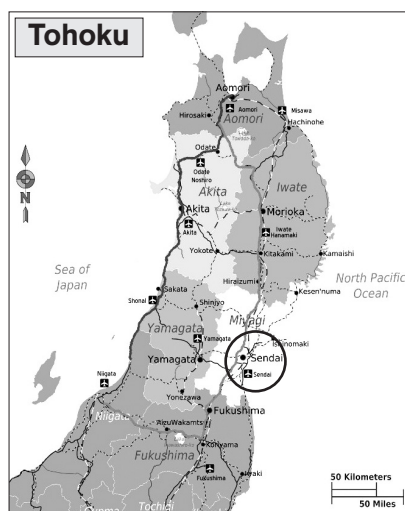
Természetesen szó sincs arról, hogy a fentiekkel rehabilitálni szeretnénk a címben szereplő mondást, de úgy érezzük, hogy a leírtakra vonatkozhat egy másik híres, ezúttal francia mondás: „honi soit qui mal y pense” [21,22], aminek álljon itt angol fordítása is: „shame be to him who thinks evil of it” és végül végakkordként magyarul: „szégyellje, aki (erről) rosszat gondol”.

## IRODALOM

- [1] D. Colguhoun, Publish-or-Perish: Peer review and the corruption of science, *The Guardian*, 2011. szeptember 5.
- [2] Braun Tibor, Miért publikálunk a tudományos kutatásban? *Tudományos és Műszaki Tájékoztatás* (2009) 327.
- [3] Publish or perish, <http://en.wikipedia.org/wiki/Publish-or-perish>
- [4] A. K. Geim, H.A.M.S.ter Tisha: Detection of earth rotation with a diamagnetically levitating gyroscope, *Physica B: Condensed Matter* (2001) 294, 736.
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Andre\\_Geim](http://en.wikipedia.org/wiki/Andre_Geim).
- [6] <http://www.ru.nl/hfml/research/levitation/diamagnetic>
- [7] M. V. Berry, A. K. Geim, Of flying frogs and levitrons, *European J. Phys.* (2001) 18.
- [8] <http://boingboing.net/2010/10/05/scientist-wins-both-html>
- [9] M. Abrahams, IgNobel, a tudomány citromdíja, *Akadémiai Kiadó*, 2006.
- [10] S. Hovmöller, Linus Hovmoller Zou, XiaodongZou, B. Grushko, *Philos. Trans. Royal Soc., A, Mathematical, Physical & Engineering Sciences* (2012) 370, 2949.
- [11] <http://www.msnbc.msn.com/id/4477999/ns/technology-and-science-science/t/vindicated-ridiculed-israeli-scientist-wins-Nobel/#.TpODRJukoQU>
- [12] [http://www.embl.de/aboutus/alumni/news\\_2000/jul\\_10\\_sven\\_hovmoeller/](http://www.embl.de/aboutus/alumni/news_2000/jul_10_sven_hovmoeller/)
- [13] <http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/32661/title/Like-Father-Like-Son>
- [14] <http://www.sudoku.oldal.eu.sudoku/sustory.html>
- [15] P. S. Blackawton, S. Airzee, A. Allen, S. Baker, A. Berrow, C. Blair, M. Churchill, J. Coles, R. F.-J. Cumming, L. Fraquelli, C. Hackford, A. Hinton Mellor, M. Hutchcroft, B. Ireland, D. Jewsbury, A. Littlejohns, G. M. Littlejohns, M. Lotto, J. McKeown, A. O'Toole, H. Richards, L. Robbins-Davey, S. Roblyn, H. Rodwell-Lynn, D. Schenck, J. Springer, A. Wishy, T. Rodwell-Lynn, D. Strudwick, R. B. Lotto, Blackawton Bees, *Biol. Lett., Animal Behaviour* (2010) december 22. <http://rsbl.royalsocietypublishing.org/site/misc/BlackawtonBees.xhtml>
- [16] L. T. Maloney, N. H. de Ibarra, Blackawton bees: com-mentary on Blackawton, P. S. et al., *Biol.Lett.* (2011) 7, 166.
- [17] J. Lubbock, *Ont he senses, instincts and intelligence of animals with special refrence to insects*, Kegan Paul, London, 1888.
- [18] K. von Frisch, *Der Farbenninn und Formenninn der Biene*, *Zool. Jahrb. Abt. allg. Zool. Physiol. Tiere* (1914) 35, 1.
- [19] <http://derigumind.frogdesign.com/articles/the-sub-stance-of-things-not-seen/a-new>
- [20] <http://www.lottolab.org/Downloads/scan0003.jpg>
- [21] [http://en.wikipedia.org/wiki/Honi\\_soit\\_qui\\_mal\\_y\\_pense](http://en.wikipedia.org/wiki/Honi_soit_qui_mal_y_pense)
- [22] <http://hu.wikipedia.org/w/index.php?title=Térdszalagrend&oldid=12630762>

# Szendai

## A hely szelleme



Tohoku tartomány térképe

### Bevezetés

A klasszikus római vallás- és gondolatvilágban a „genius loci” óvó, védelmező szellem volt; olyan alakkal jelenítették meg, amelyik a fején bőségszarut, a karján kígyót hordoz. Mai köznapi használatában ez egy hely, helyszín megkülönböztető légkörét, a „hely szellemét” jelenti. Ebben az írásban a hely szelleme a jelleget és teret adó környezeti teljességekben nyilvánul meg. A helyeket országgént, vidékként, tájként, településként ismerhetjük, és eszünkbe juttathatja, hogy mit idéz fel bennünk, mit vált ki belőlünk valamely hely szelleme. Az írás Szendai szellemét idézi fel, egyszerűen azért, mert a szerző valamikor régen ott élt és dolgozott, és ottléte mély nyomokat hagyott benne. Az esemény, ami ezt az írást kiváltotta, 2011. március 11-én délután következett be, és minden felesleges drámaiság mellőzésével apokalipszisként jellemezhető. Egy világ tudja, a hírekben hallotta, a képernyőn látta, hogy az említett időpontban Japánban a Honsú-sziget északi Tohoku tartományának fővárosát, Szendait és teljes tengerpartját a Richter-skála szerinti 9-es erősségű földrengés rázta meg, amit a part közeli tengeri epicentrum következtében elemi erejű szökőár (cunami) követett.

Ez az írás nem tudományos úti jelentés, hanem egy olyan szemtanú gondolatainak a rögzítése, aki ismerte a kataklizma helyszínét és szellemét, de aki a tragikus esemény megtörténekor nem volt ott. Ezzel szemben jelen volt sok évvel ezelőtt máshol, egy hasonló jellegű földrengés helyszínén, és átélhette azokat az érzéseket, amiket a szendai földrengés résztvevői 2011. március 11-én átélhettek.

A szerző abban a szerencsében és megtiszteltetésben részesült, hogy az utóbbi 25 év során hat alkalommal tölthetett hosszabb-rövidebb időt Japánban. Ebből négy utazás során kongresszusokon vett részt az ország különböző színhelyein. A többi utazás egy három hónapos és négy évvel később egy háromhetes vendégprofesszori meghívás eredménye volt.

A hosszabb tartózkodás során a szerző a szendai Tohoku University Aobayama<sup>1</sup> kampuszán lévő kémiai intézetben oktatott és kutatott [1, 2]. A hely szelleme azóta is él benne.

A háromhetes ottlét alatt a Tokyo Metropolitan University hochiagi kampuszán lévő kémiai intézetben oktatott, és innen indulva hosszabb körutazás során számos helyen adott elő, így Szendaiba is visszatért. Ez az írás elsősorban a szendai tartózkodással, a várost és környékét ért eseményekkel, és dióhéjban az események természetével foglalkozik.

Külön hangsúllyal kell kiemelni, hogy bár közhelyszerű ismeretek szerint Japánban folyamatosan tapasztalhatók általában kisebb földmegmozdulások, rengések, jelen szerző hat látogatásának összesen körülbelül 150 napja során egyetlen egyszer sem élt át vagy érzett ott földmozgást vagy rengést.



<sup>1</sup> Néhány közismert földrajzi néven kívül a japán neveket angol átirásban közöljük.

## A JSPS-meghívások

Szerző mindkét hosszabb idejű tartózkodását a japán *Society for the Promotion of Science* (JSPS, Nihon Gakujutsu Shinko Kai) meghívása tette lehetővé.

A JSPS non-profit alapítványként létesült 1932-ben Showa császár adománya alapján, és 1967-ben vált NGO-vá (Non-governmental Organization) a japán Oktatási, Tudományos, Sport és Kulturális Minisztérium felügyeletével. 2003-ban adminisztratív szempontból teljesen önálló intézménnyé vált.

Szendai a Mijagi prefektúra fővárosa, Tohoku tartomány legnagyobb városa. Lakosainak száma körülbelül egymillióra tehető, a Honsú-sziget megalopoliszainak (Tokió, Oszaka, Kobe...) lakosságához képest kimondottan szerénynek számít. A várost 1600-ban létesítette Date Masamune hadúr és a „fák városa”-ként is jellemzik. Szendai a csodálatos japánkertek, a japán kertkultúra egyik fellelője.

A várost körülbelül 10 kilométernyire a tengertől, talán Rómához hasonlóan, több dombon, a nyugati Ohu-hegységig terjedő helyre építették, és a Hirosegawa folyócska szeli ketté, mint Budapestet a Duna.

Szendai gyönyörű földrajzi fekvésű, korszerű építésű és közlekedésű város, lakosságához illő emberi méretekkel, ahol még a „felhőkarcolók” is csak körülbelül 10–30 emeletig magasodnak.

A mai nevén ismert Tohoku Egyetem orvosi iskolaként létesült 1736-ban. 1907-ben változott egyetemmé a Meiji kormányzat döntéseként Tohoku Imperial College néven.



A szerző Szendaiában átadja Nobuo Suzuki professzornak a George Hevesy-díjat [7]

Jelenleg az oktatás japán és angol nyelven öt kampuszon folyik. Jelen szerző az Aobayama kampuszon, a Graduate School of Science-en dolgozott. 2009-ben a Tohoku Egyetemen körülbelül 18 000 hallgató tanult. Az egyetemi alapítvány szelleme szerint az egyetem működése három fő értékre épül: „Kutatás”, „Nyitott kapuk” és „Gyakorlat-vezérelt kutatás és oktatás”. Nem maradhat említés nélkül, hogy az egyetem felszereltsége, műszerezettsége, oktatási gárdája és oktatása világ színvonalú, és az intézmény egyike japán tíz legjobb egyetemének.

A szerző szendai meghívói Nobuo Suzuki és Kenji Yoshihara professzorok voltak. Akkoriban Suzuki professzor a Department of Chemistry vezetője, Yoshihara professzor a kar dékánja volt. Ottléte alatt a szerző abban a megtiszteltetésben részesült, hogy ő adhatta át Suzuki professzornak a *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* főszerkesztőjeként kiemelkedő radioanalitikai kutatásaiért a nemzetközi George Hevesy- (Hevesy György) díjat [7].

Az egyetemen a szerzőt kollégái, előadásainak hallgatói olyan különlegesen kedvesen, érdeklődéssel és barátsággal fogadták, hogy a szívélyes légkör, az állandóan érzett otthonosság megkönnyítette beilleszkedését az új környezetbe.

## Az apokalipszis

Az apokalipszis ó- és újszövetségi jelentésén túlmenően borzalmas katasztrófát jelent, ami magában foglalja a katasztrófa rendkívüli méretű, elemi csapásként való szóvárt értelmezését. A Japánt sújtó 2011. március 11-i események hármas koincidenciának is tekinthetők. A koincidencia szó értelmezésünkben események olyan véletlen egybeesését vagy egymásutánosságát jelenti, amelyeket váratlanul vagy meglepően érzünk. Bár általában a koincidens (együtt történő) események között nem feltétlenül merül fel az ok-okozati összefüggés, szerző a Szendai és vidékén történeteket az alábbi hármas koincidenciának tekinti (legalábbis következményi szempontból) [3]:

- 1 földrengés,
- 1 szökőár (cunami),
- 1 nukleáris baleset.

Valószínűségi szempontból a koincidenciák annál ritkábbak (vagy valószínűtlenebbek), minél több egyedre vagy eseményre vonatkoznak. Ha a szendai eseményeket koincidencia-szempontok szerint értékeljük, együttes előfordulásuk az emberi történelem 2011. március 11-i időpontjáig a legjózanabb ész, előrelátás, prognosztika szerint elképzelhetetlen volt. A lehetetlennel arányosak a károk és következmények is, de a hely japán szelleme hozzájárul ahhoz, hogy bár az áldozatok száma ez esetben is iszonyatosan magas, hasonló erejű események áldozatszámához képest eddig (2011. április 6.) szerényebbnek bizonyul.

## A földrengés

A huszadik század vége és a huszonegyedik század eleje nem fukarkodott jelentős mértékű földrengésekben. Minden alaposabb érvelés nélkül gondoljunk itt csak a Haitit, Chilét, Új-Zélandot és Kínát ért ilyen eseményekre. Persze gondolhatunk a Richterskálára is, a Japánt ért első rengés előbb 8,5-es, majd később 9,0-ra módosított erőssége még azon a vidéken is rendkívülinek te-

## Szendai

kinthető. Az azonban ma már köztudott, hogy Japán történetében a 2011. március 11-i volt a legnagyobb és legpusztítóbb, és világviszonylatban is a máig ismert 10 legnagyobb földrengés egyike.

Nincs a világon olyan ország, amelyik a földrengések kutatására, előrejelzésére Japánnál nagyobb figyelmet szentelt volna. Egyetlen példaként említhető, hogy a szerző ottani utazásai során vendéglátói több olyan iskolalátogatásra hívták meg, ahol számos érdekesség mellett csaknem mindenütt bemutatták a „földrengés-szimulátort”, azaz egy kocka formájú, padokkal, katedrával, táblával berendezett, gumitömbökre szerelt tantermet, amiben osztályfőnöki óra közben a diákokat a szoba különböző erősségű rázásával a földrengések megszokására, a szükséges viselkedésre oktatták. Minden intézményben, egyetemen, üzemben, vállalatnál, bevásárlóhelynél rendszeres képzésben részesítették az alkalmazottakat, hallgatókat a földrengés során javasolt viselkedésre. Ilyen képzésen jelen szerző is többször részt vett.

Ezek a felkészülési intézkedések nem maradtak eredménytelenül a 2011. március 11-i esemény során.

A kalamitásokkal szembesülve 2011. március 11-én egy jól felkészített, tisztességtudó, felelősségtudó nép rendkívül fegyelmezetten, mondhatnánk sztoikusán viselte az események terhét. Egyáltalán nem, vagy csak alig volt fosztogatás, visszafogott a panaszkodás, és talán máshol elképzelhetetlen a szolidaritás. A világ médiumai erről az események után részletesen beszámoltak.

A 9-es erejű földrengés óriási, körülbelül 30 000-szeres hirosimai robbanási energiának felelt meg. Amennyiben nincs koincidencia, és a földrengés az egyetlen esemény, a károk mértéke, az áldozatok száma – nyugodtan állíthatjuk – meglepően alacsony lett volna. Szendaiban, de Tokióban sem dőltek össze az épületek, még a felhőkarcolók sem. Persze az épületekben belső károk előfordultak, de például a körülbelül 50–60 japán kollégának, barátának küldött aggódó és együttérzést kifejező levélre érkező, szerencsére sok válasz közül említjük itt például *Yuichiro Nagame*, a szendai *Tohoku University* professzorának március 22-i levelét: *All my family and colleagues are fine, but the institute was extremely damaged. The electricity has been just restored this morning but we have no water supply still now in the institute.* Hat levélre mindmáig nem jött válasz, de szerző szívből reméli, hogy csak azért, mert a címzettek mással voltak elfoglalva.

Japánban hagyományosan fából építkeznek, és vidéken az általában földszintes vagy egyemeletes családi házak a föld mozgásakor inkább elhajoltak, de nem dőltek össze. A vasbetonból épített, több métert kilengő magas házak Szendaiban nem, de például még Tokióban sem dőltek össze. Az egyetem épülete is ép maradt, a látképek ugyanazt mutatták a földrengés után, mint előtte. Nagame professzor levele is csak belső, a villany- és vízvezetékek jelentős, de nem végzetes káraitól számolt be.

## Földrengés-előrejelzés

Említettük már, és most is megerősítjük, hogy egy teljes nép alaposabb, tudatosabb, aprólékosabb felkészítése földmozgási eseményekre Japánnál jobban nehezen elképzelhető. Felmerül a kérdés, hogy mi a helyzet az előrejelzéssel. A szerző tudomása szerint ez irányban Japánban, de sokfelé a világon komoly kutatások folynak, ám a mai napig teljesen megbízható, akárhol, akármikor igénybe vehető előrejelzési lehetőség sehol sem állt vagy áll rendelkezésre.

A pénteki napon, 2011. március 11-én délután 14:30-kor bekövetkező, 6,5, majd 9,0 Richter-skála erősségű, Szendaitól 110 kilométerre, a Csendes-óceán körülbelül 29 kilométer mélységéből induló földrengés időpontját előre jelezni lehetetlen lett volna. Szakértők már évekkel azelőtt említették egy nagy földmozgás valószínűségét. Ennél többet a kitűnően felszerelt szeizmológiai intézetek és megfigyelőállomások, a legjobban képzett szakemberek sem tettek és nem is tehettek. Csak hajszállal jobbak a tengerfenéki epicentrumokból induló, a tengerparti vidékeket fenyegető szökőár (cunami) előrejelzési lehetőségei. Például a Szendai közeli, part alatti rengés által indított körülbelül 10–15 méter magas szökőárhullám utólagos szakértői vélemények szerint körülbelül 807 kilométer/óra sebességgel száguldott Szendai és Tohoku tartomány partja felé. Amennyiben magát a rengést jelezték is Japánban, a rengés pillanatában az erre felállított rendszereknek a szökőár néhány percen belüli érkezésére és a lakosság figyelmeztetésére semmilyen esélye nem volt.

## Szökőár (cunami) és szökőár-tudomány

Mint az előzőekben már említettük, a jelenlegi japán tragédia fő okozója nem a földrengés, hanem az annak eredményeként, illetve következményeként a tengeri epicentrumból elindult szökőár volt. Mint ahogy a mindenki által látott tv-felvételek sajnos nagyon alaposan és aprólékosan bemutatták, a hatalmas ár elsodort mindent, amivel találkozott; egymáshoz csapott, bedarált, összezúzott épületet, földi járművet, hajót. Állva csak a mélyen földbe alapozott vasbeton építmények maradtak, azokból is ki-mosva csaknem mindent, ami vízmagasságig mozgatható, letéphető volt.

A szökőárak történelme, beleértve a megfigyelésük krónikáját, messze a múltba nyúlik vissza, és már a 15. század óta jegyzésre talált [4]. A most Japánban tapasztalt és előzőleg számos helyen okozott jelenségek miatt a szökőárak a tudomány és a tudományos kutatás külön területévé váltak [5]. A téma folyóirat-irodalma több ezer tétellel növekedett [6].

## Nukleáris következmények

A földrengés és a szökőár okozta problémáknak, a fukusimai nukleáris erőműnek, illetve a Tokyo Electric Power Co. (TEPCO) nukleáris reaktorainak és károsodásainak elemzése messze meghaladja e munka kereteit annak ellenére, hogy jelen szerző kétszer is előadást tartott a fukusimai atomerőműben. Ettől függetlenül ez a kérdés a közelmúltban és jelenleg is rendkívüli figyelmet



## Levél Limából

**Lima, 1970. június 3.**

Vasárnap volt, 1970. május 31-e. A mexikói labdarúgó VB megnyitó napja. A labdarúgó-szurkolók (és melyik perui vagy itt élő magyar nem az?) aznapi programja réges-régen el volt döntve: séta, pihenés, déli 12-ig, aztán odaülni a tv elé és nézni a Mexico City-i megnyitó ünnepséget, majd a Mexikó-Szovjetunió meccset. Negyedik emeleti lakásunkban mi is ezt tettük. A mérkőzés utáni percek öltözködéssel, majd újságolvasással teltek. Három óra húszkor a fotelben ülve egy viszonylag enyhe földlökést éreztünk. Ez körülbelül olyan, mint amikor valaki hirtelen ránt egyet a fotelen. Első pillanatban nem ijedtünk meg, hiszen ittlétünk alatt már többször előfordult ilyesmi. Most azonban az első lökést egy újabb, valamivel erősebb követte, majd elszabadult a pokol. Tompa, egyre erősödő dübörgés hallatszott, miközben az egész hétemeletes épület úgy recsegett-ropogott, mint egy marokba szorított gyufaskatulya. A padló hullámozott, mint a viharos Balaton, és az utcáról egyre erősebb ordítozás, jajveszékélés és sikoltozás hallatszott. Első ösztönös gondolatunk az volt, hogy ki kellene rohanni a szabadba. Igen ám, de hogyan jusson le az ember a negyedik emeletről, amikor a lift nem működik, és a lépcsőház messze van, azonkívül keskeny, és mindenki arrafelé tolakszik? Átvillant agyunkon, amit ilyen esetekről eddig hallottunk: a legokosabb nem rohanni, hanem – ha van – egy beton keresztgerenda alá állni és kivárni a végét. Sikerült odatámaszkodnunk a gerenda alá. Mindketten (a kis Robi nagyon keveset értett az egészből) falfelhérre váltunk. Érdekes volt megfigyelni, hogyan terjed bennünk a félelem és az iszonyat. A dübörgés, recsegés-ropogás folytatódott. A falak egymás után repedtek meg, a vakolat hullott, a vázák, könyvek és egyéb tárgyak úgy potyogtak sorban, mint az érett almák a fáról. Egyikünk sem ijedős természetű, és átélünk már egyet a más. Most azonban meg voltunk győződve, hogy nincs tovább, másodpercek alatt összeomlik a ház, betemetve, szétnyomva mindent. A falhoz lapulva azokra gondoltunk, akik otthon visszavárnak és arra is, hogy a félszkes fene hozott bennünket ide; nem tudtunk nyugodtan ülni a fenekünkön a Mohai úton, ahol nincs ugyan ennyi látnivaló és romantika, de szilárd a talaj, és legfeljebb a lift romlik el náha. Ha van világvége, ha igaz, hogy volt Szodoma és Gomora, ha van pokol és utolsó ítélet, akkor ilyennek kell lennie. Nem tudom elképzelni az irtózat magasabb fokozatát. A test megbénul, az agy kikapcsolódik és törött gramofonlemezként csak egyet ismétel: legyen már vége, legyen már vége, legyen már vége. És valóban – a ház nem dőlt össze, a lökések egyre csillapodtak, a recsegés csendesült, majd teljesen megszűnt. Az volt az érzésünk, hogy órákig tartott. Utólag tudtuk meg – és ma sem tudjuk elhinni –, hogy az egész összesen 40 másodpercig tartott, a kezdő és befejező mozgással együtt két percre. Meg voltunk győződve róla, hogy legalább fél Lima összedőlt. Amint a rengések elcsendesedtek, lementünk az utcára. A lépcsőház, az utca telve remegő emberekkel. Számoson ájultan feküdtek a földön. Beültünk a kocsiba, és járni kezdtük a város utcáit. Mindenütt sérült, rohanó tömeg, tiűkölő, száguldó autók, de a legnagyobb csodálkozásunkra minden ház állt, még a felhőkarcolók, templomok és vályogépületek is. Sok helyen feküdt törmelék, üvegdarab a járdán, de ezen kívül (és a kétségbeesett tömegen kívül) a földrengésnek semmi nyoma sem volt. Ez kicsit megkönnyebbített. Lassan-lassan azonban kezdtek szállingózni a hírek, és ma már kialakult az iszonyatos tragédia sajnos még mindig nem teljes és végleges képe. A földrengés epicentruma kb. 350 km-nyire volt Limától, egyesek szerint a tengerben, 30 km-nyire a perui parttól, Chimbote kikötővel szemben. Mások szerint Yungay városa alatt kb. 80 km-nyire a parttól. A legerősebben sújtott terület több ezer négyzetkilométernyi kiterjedésű, Limától északra, főleg a Fekete- és Fehér-Andok vidékén fekszik. A sújtott területek nagy részével mindmáig teljesen megszakadt az összeköttetés. Rádióamatőrök híreiből és légi felderítésből annyit már tudunk, hogy az áldozatok száma meghaladja a 30 000-et. Több kisebb város és falu teljesen eltűnt. Minden vonalon teljes a káosz. Jómagunk nem vagyunk veszélyben és Limában az élet majdnem normális. Nagy a valószínűsége annak, hogy egyelőre újabb földrengés nem fenyeget, és pár hónap múlva személyesen is beszámolhatunk mindenről... [9]

met kapott és folyamatosan kap az elektronikus és nyomtatott médiában. Jelen pillanatban (2011. április 6.), amikor számos ehhez kötődő kérdés még nyitott, és a végkifejlet a terület szakemberei előtt is beláthatatlan, hiábavaló lenne bármit jóslni vagy jövendőlni. Tény, hogy a japán kormány véleménye szerint is a baj nagy, és csak remélni lehet, sőt kell, hogy sikerül rajta felülkerekedni.

### Lima, Peru

Vasárnap, 1970. május 31-én délben Peru Ancash és La Libertad megyéinek csendes-óceáni, a fővárost, Limát is magában foglaló partjait – Casma és Chimbote városoktól 35 kilométernyire, a tengerben lévő epicentrumból induló – Richter-skála szerinti 7,9-8,0 erősségű földrengés rázta meg [8]. A rengés elérte Limát és más kisebb városokat, falvakat is, de egyúttal destabilizálta az Andokhoz tartozó Huascaran-hegység nyugati falait, szikla-, kő- és hólavínát okozva, ami a völgybe lezúdulva teljesen betemette Yungay és Ranrahirca városkákat és számos ott lévő falut. Szinte elképzelhetetlen, szerencsés véletlennek tulajdoníthatóan a tenger alatti epicentrumból induló rengést nem követte szökőár. Ennek geofizikai magyarázatával itt nem foglalkozhatunk.

Ezzel szemben a hatás 83 000 négyzetkilométernyi, Belgiumnál és Hollandiánál nagyobb területre terjedt ki. Chimbote, Carhuaz és Recuay városkáiban az épületek 80-90%-a összeomlott, az áldozatok számát körülbelül százezerre becsülték.

## Szendai



Yungay, Peru, 1970

A sors kegyetlen véletlenje folytán szerző és családja azon a napon Limában tartózkodott, ahol másfél éves hivatalos kiküldetésben az ENSZ-hez tartozó, bécsi székhelyű Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (International Atomic Energy Agency, IAEA) szakértőjeként dolgozott. Feladata volt, hogy a limai *Junta de Control de la Energia Atómica*ban (Atomenergiái Kutatóintézetben) bevezesse és koordinálja azokat a vizsgálatokat, amelyek során a Mururoa-atollban végzett, nyílt színi kísérleti atombombabarobantásokkal feltehetően okozott radioaktív szennyezéseket mérik a Dél-Amerika nyugati partjai mentén fekvő országokban.

A földrengés alatti érzéseiről szerző a rengés másnapján levelet küldött körülbelül nyolcvan magyarországi és a világ más tájain élő rokonának, barátjának és kollégájának. A levelet a szerző barátja, sokévi munkatársa és tudományos társszerzője, *Juraj Tölgýessy* professzor, a bratislavai Műszaki Egyetem radiokémiai tanszékének akkori vezetője közzétette a pozsonyi *Tudomány és Társadalom* (TéT) című havilapban [9].

A szerző meggyőződése, hogy a közelmúltbeli japán tragédia átélőinek a nagyközönség általi jobb vagy még jobb megértését segíti egy olyan spontán vallomás, amit olyan valaki írt le, aki maga is átélte, sőt túlélte egy a szendaihoz hasonló méretű földrengést.

## IRODALOM

- [1] T. Braun, H. Imura, N. Suzuki, J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. (1987) 119, 315.
- [2] K. Yoshihara, M. Hiraga, G. Izawa, T. Braun, J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. (1983) 126, 87.
- [3] Beck Mihály, [http://www.termesztvilaga.hu/fizika\\_eve/szkeptikus/koinc.html](http://www.termesztvilaga.hu/fizika_eve/szkeptikus/koinc.html)
- [4] National Geographical Data Center (NGDC) Tsunami database, <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/hazard/tsu.shtml>
- [5] National Tsunami Hazard Mitigation Program, Designing for Tsunamis: Seven Principles for Planning and Designing for Tsunami Hazards, [http://www.pmel.noaa.gov/tsunami-hazard/Designing\\_for\\_Tsunamis.pdf](http://www.pmel.noaa.gov/tsunami-hazard/Designing_for_Tsunamis.pdf)
- [6] Wen-Ta Chiu, Yoh Shan Ho, Scientometrics (2007) 73, 3.
- [7] K. Yoshihara, 1985 Hevesy Medal Awarded to Professor Nobuko Suzuki, J. Radioanal. and Nucl. Chem. Lett. (1985) 103, 79.
- [8] Peru's Earthquake of 1970, <http://earthquake-facts.net/Peru-Earthquake.html>
- [9] Braun Tibor, Tudomány és Társadalom (Bratislava) (1970) 8, 47.

# Tudományos kutatási adatok és ismeretek vizuális megjelenítése

## Rendhagyó könyvbemutató\*

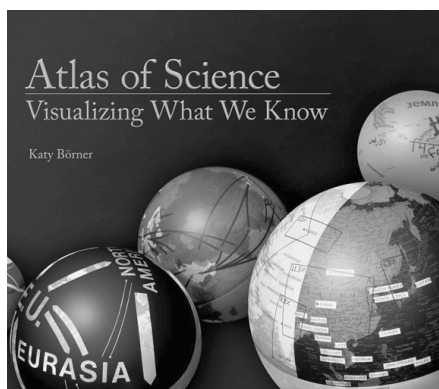
### Előszó

A továbbiak jobb átlátása érdekében etimológiai, illetve fordítási magyarázattal tartozunk. Ugyanis témánkhoz az angol nyelvben használt *visualisation* a kulcsszó. Sajnos, e szónak nincs szótári magyar megfelelője. Elsőre *vizuális láttatásra* gondoltunk, de az nyilvánvalóan pleonazmus, ezért a *vizuális megjelenítést* választottuk annak tudatában, hogy nehezen veheti fel a versenyt angol nyelvű megfelelőjével. Amennyiben a *vizualizálás* ad hoc magyarosításként elfogadhatónak tűnik, úgy talán az is tekintetbe vehető itt. Sajnos, a témához tartozó másik angol szó, a *mapping* is nehézségeket támaszt, mert amennyiben a tudomány, illetve a tudományos kutatás területén használjuk, a szótári fordítása, azaz a *leképezés, térképezés, térképezés* nagyon elterjedt köznap, geográfiai vonatkozásai miatt némileg hiányosnak, félreértelmezhetőnek tartható.

### Bevezetés

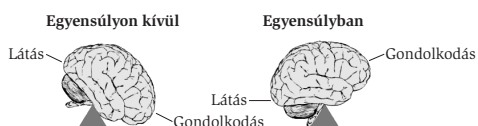
Ma már közhelynek is nevezhető, hogy világunk zsúfolásig van tudománnyal kapcsolatos adatokkal és ismeretekkel, sőt ezekből több van, mint eddig valaha [1], és egyre szükségesebbé válik azoknak az utaknak a keresése, amelyek hozzásegítik, illetve hozzásegíthetik a tudományos kutatókat és másokat, hogy átlássák, feldolgozhassák, megértsék ezeket az adatokat. El kell mondanunk, hogy az 1759-ben született mérnök, könyvelő, feltaláló, politikai közgazdász és még számos más elfoglaltságot űző skót *William Playfair* volt az [2], aki a számszerű adatsorok és táblázatok jobb áttekintése érdekében a vizualizálás előfutáraként megalkotta a statisztika grafikai módszereit.

Playfair négyféle diagramot talált fel: 1786-ban a vonalas grafikont és oszlopdigramot gazdasági adatokhoz, majd 1801-ben a kördiagramokat (*pie chart, circle graph*). Ezeket 1786-ban és 1801-ben publikált könyveiben [3,4] saját statisztikai adatainak grafikai megjelenítéséhez, illetve értelmezéséhez alkalmazta. Diagramjai vizuális újításokat ihlettek, és az érdeklődők számára az adatok olyan mintázatait tették láthatóvá, amelyek a hosszú számsorokkal megtöltött oldalak szemlélésekor rejtve maradtak volna. A kezdeti próbálkozások körvonalazása után nincs szándékunkban az adatok grafikai feldolgozásának teljes, különben rendkívül érdekes történetét ismertetni. Ezért fő témánkhoz, az ismeretek vizuális megjelenítéséhez térnénk vissza, idézve a jelen szerző által e téren legrészletesebbnek ítélt, az amerikai *Katy Börner* által nemrég publikált alapművet (1. ábra). Ez a mű bemutatja a tudomány, illetve a tudás szemszögéből nézve mindazt a fejlődést, amit a számítástechnikai lehetőségek el tudtak érni



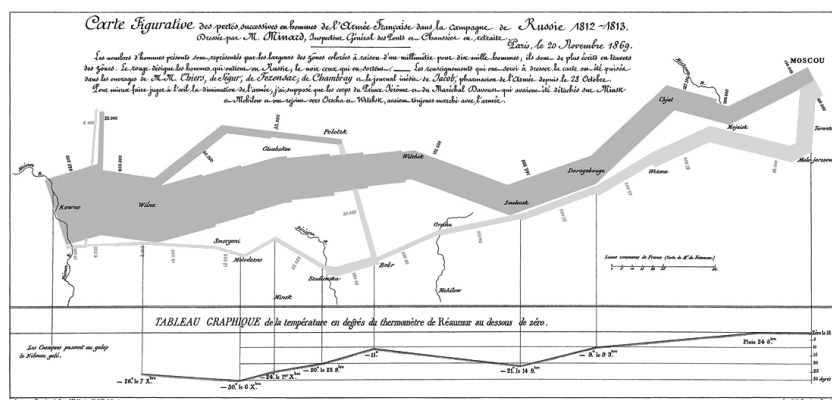
1. ábra. Alapmű

\* Katy Börner: Atlas of Science. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, 2010.

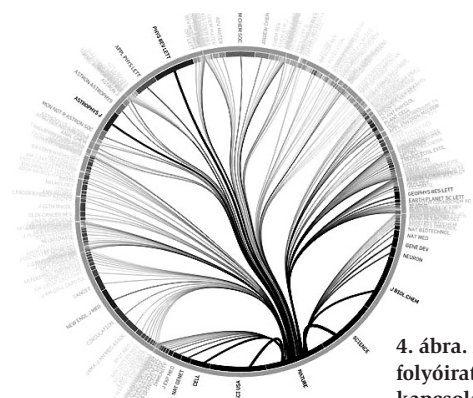


2. ábra. A látás és a gondolkodás egyensúlya az agyban [6]

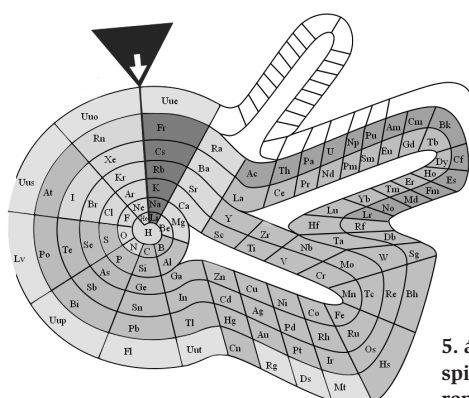
3. ábra. Napóleon moszkvai hadjárata







4. ábra. A Nature folyóirat idézettségi kapcsolatrendszere [9]



5. ábra. Theodor Benfey spirális periódusos rendszere

a grafikával. A tudás egészével foglalkozó, illetve annak csaknem minden területet érintő könyv többek között a kutatásra is kitér. Jelen ismertetés célja néhány általános érdeklődésre számot tartó példa bemutatása és a kimondottan kémiai vonatkozások kiemelése.

Következzen egy elhatárolódás is: jelen dolgozat és az ismertetett könyv sem érinti az atomok és szerves molekuláik számítógépes grafikai modellezését és a képalkotást (*imaging*) sem, amely néha talán megtévesztően átlapolhatja vagy félreértelmezheti jelen ismertetés témáját.

A főleg angol szakirodalom *imaging*-nek, leképezésnek, képalkotásnak nevezi azt az eljárást, amely egy adott kémiai minta összetételéről, szerkezetéről és/vagy dinamikájáról nyújt vizuális jelet. A kémiai képalkotás széles körű műszeres technikákat alkalmaz; ezek mindegyike a fény vagy más sugárzás anyaggal való kölcsönhatásán alapul [5].

## Adatvizualizálás

Az adatok és ismeretek vizualizálása azért hasznos és eredményes, mert az észlelés, érzékelés és megfigyelés közötti egyensúlyt abba az irányba mozgatja el, amelyben az agy képességeit teljes mértékben igénybe veheti. A látás (azaz a vizuális észlelés), amit az agy hátsó felében elhelyezkedő vizuális kéreg kezel, általában rendkívül gyors és hatékony. Csekély erőfeszítéssel, rögtön (pillanatnyi idő alatt) látunk. Az agykéreg elülső részéhez kötődő gondolkodás sokkal lassabb folyamat. A hagyományos adatértelmezés és -bemutatás átfogó tudatos gondolkodást igényel. Az adatok és ismeretek vizualizálása viszont eltolja az egyensúlyt a vizuális észlelés irányába: amikor lehetséges, szemünk éles és érzékeny látására épít, amint a **2. ábra** jelzi.

## Példák a vizualizálásra

Mielőtt a jelzett kémiai témára rátérnénk, be szeretnénk mutatni részben a könyvből, részben az újabb szakirodalomból válogatott néhány meggyőző, általános vizualizálási példát.

### Napóleon moszkvai hadjárata

Charles Joseph Minard francia hadmérnök vizualizálását (**3. ábra**) sokan az ilyen ábrázolások legjobbjának, legkifejezőbbjének vélik, különösen akkor, ha tekintetbe vesszük, hogy a számítástechnika előtti időben készült. Az ábrázolás Napóleon sikertelen oroszországi hadviselését, illetve hadseregének elpusztulását szemlélteti 1812-ben. A hadsereg indulásakor 422 000 emberből 100 000 érte el Moszkvát és 10 000-nél kevesebben tértek vissza. Elemzők kiemelték, hogy Minard vizualizálása hat adat rögzítésére volt képes egyidejűleg. A fő vonal folyamatosan követi a hadsereg méretét. Ugyanakkor a vonal jelzi a hadsereg mozgásának szélességi és hosszúsági fokát. Mutatja még a hadsereg utazási mozgását offenzívában és visszavonulásban egyaránt. Jelzi a hadsereg helyét is különböző időpontokban. Végül a külső hőmérsékletet is bemutatja a visszavonulás során.

### A Nature folyóirat kapcsolatrendszere

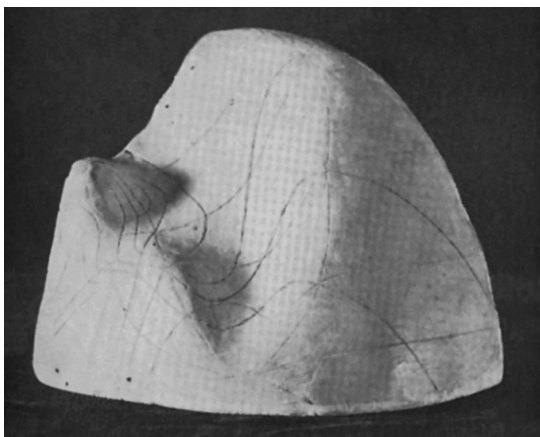
A folyóiratok közötti kapcsolatokat mutatja be az **4. ábra**, a világ egyik legjobbjának tartott természettudományi folyóirat, a *Nature* példáján. A kapcsolatrendszert a folyóirat-folyóirat közti idézettség alapján számszerűsítették.

## Válogatott példák a kémia és a kémiai kutatás vizualizálására

### A periódusos rendszer

Nem túlzás azt állítani, hogy a *Mengyelejev* névvel összeforrt periódusos rendszerek a kémiai vizualizálás őstípusainak tekinthetők. Nincs a világon tankönyv, tanterem vagy laboratórium, amelyik teljesnek tekinthetné magát az elemek periódusos rendszere nélkül.



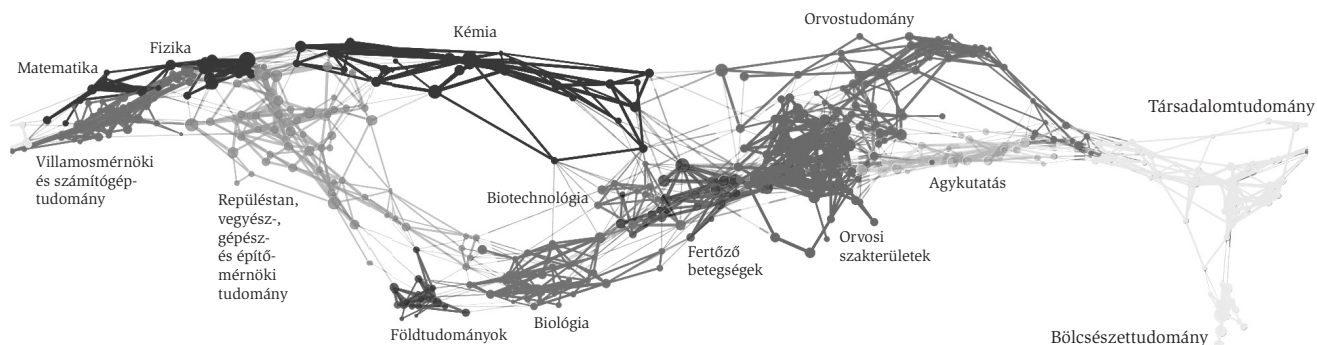


6. ábra. Maxwell termodinamikai felülete [15]

heez hasonló tulajdonságokkal rendelkező, fiktív anyag különböző állapotainak háromdimenziós ábrázolása [15]. Az idom (szobor) képe egy 1942-ben publikált könyvben jelent meg először [16].

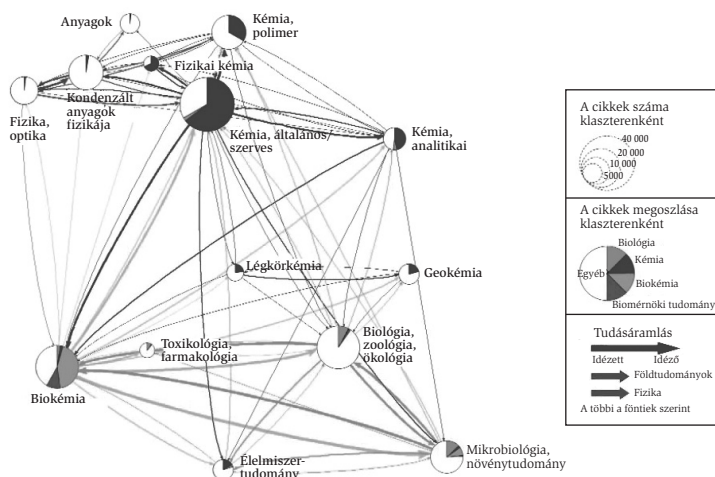
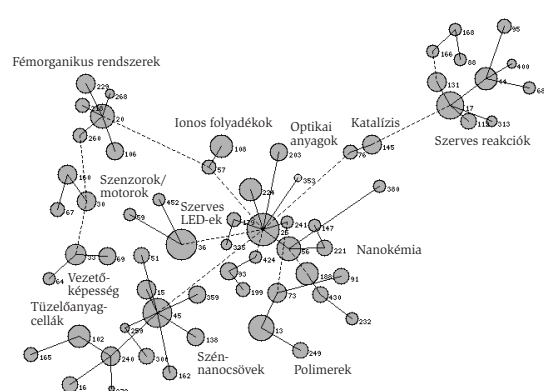
## A kémia helye a természettudományok térképén

A természettudományokban manapság megfigyelhető integrálódási és átlapolási interdiszciplináris törekvések idején hasznosnak tekinthető egy olyan vizualizálási lehetőség, amely rálátást ad a különböző területek elhelyezkedésére, csatlakozási pontjaira, összefonódásaira. A 7. ábrán bemutatott térkép egy hatalmas folyóiratszócikk- és konferenciadolgozat-adatbázis alapján ké-



7. ábra. Tudományterületek csatlakozása, összefonódása [17]

8. ábra. A kémiai kutatási frontok térképe [19]



9. ábra. A kémia kapcsolatrendszerének és információáramlásának kölcsönhatása a biokémiával, a biológiával és a biomérnöki tudománnyal [20]

## Tudományos kutatási adatok és ismeretek vizuális megjelenítése

szült. A feldolgozás 2001 és 2005 között 16 000 folyóiratban megjelent 7,2 millió cikket vett számba. Először háromdimenziós ábrázolást alkalmaztak, amely a természettudomány szakterületeit, folyóiratok csoportosítása alapján, egy gömbre helyezte el. A tengeri térképészetben alkalmazott Mercator-vetítéssel a gömbi ábrázolást laposították kétdimenziós térképpé [17].

Egy még nagyobb adatbázis-gyűjteményre építve a Los Alamos-i Nemzeti Laboratórium kutatói elkészítették egy továbbfejlesztett, szerintük viccesen Tejúthoz hasonlítható vizualizálást [18].

Egy lépéssel közelebb lépve a kémiai kutatáshoz, nemrég az úgynevezett kutatásifront-*(research front)* adatokra támaszkodva is elkészítették a kémiai kutatás vizualizálási térképét a Thomson Reuters cég által publikált *Essential Science Indicators* alapján (8. ábra). A kutatási frontok közötti kapcsolatokat az együttidézések alapján számolták, azaz aszerint, hogy kurrens cikkek milyen mértékben idéznek együtt két kutatási frontot. A kialakult csoportokat klaszterező eljárás fogja össze nagyobb aggregátumokká. A térképen minden kör a kémia egy szélesebb aggregátumába sorolja a kutatási frontokat [19].

## Végszó

E dolgozat célja a figyelemfelhívás volt egy, az univerzális tudás, de a kémia szempontjából is fontos és jelen szerző szerint monumentálisnak mondható műre, ami csaknem monografikusan fogja össze tudományos ismereteink tárházát. A könyv eleve nagyon általános, ezért villantásnyi bemutatása mellett az volt a fő cél, hogy kiemeljük a vizualizálás lehetőségeit és hasznát a tudományos kutatásban, külön hangsúllyal a kémiai kutatásra.

Végül még érdemes megemlíteni, hogy a kémiai kutatás helyzetéről, illetve a biokémiával, a biológiával és a biomérnöki területtel fennálló kölcsönhatásairól szintén az itt ismertetett atlasz szerzője és munkatársai végezték talán a legrészletesebb térképezési-vizualizálási vizsgálatot, 7227 folyóirat cikkeinek klaszterezése alapján (9. ábra) [20].

## IRODALOM

- [1] Braun Tibor: Adat-, információ- és ismeret-tárolás az örökkévalóságnak. Remények kvarcban és DNS-ben. Magyar Kémikusok Lapja, 2013. december.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Playfair](http://en.wikipedia.org/wiki/William_Playfair)
- [3] W. Playfair: The Commercial and Political Atlas.
- [4] W. Playfair: Statistical Breviary. Shewing, on a Principle Entirely New, the Resources of Every State and Kingdom in Europe, London, Wallis, 1801.
- [5] Visualizing Chemistry: The Progress and Promise of Advanced Chemical Imaging, National Academics Press, [www.nap.edu](http://www.nap.edu)
- [6] [http://www.interaction-design.org/encyclopedia/data\\_visualization\\_for\\_human\\_perception.html](http://www.interaction-design.org/encyclopedia/data_visualization_for_human_perception.html)
- [7] <http://www.chrisharrison.net/index.php/Visualizations/BibleViz>
- [8] <http://www.openbible.info/blog/page/2/>
- [9] <http://www.webdesignerdepot.com/2009/06/50-great-examples-of-data-visualization/>
- [10] <http://www.learningfundamentals.com.au/wp-content/uploads/chemistry-map.jpg>
- [11] [http://www.meta-synthesis.com/webbook/35\\_pt/pt\\_database.php?PT\\_Id=449](http://www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?PT_Id=449)
- [12] W.F. Shelan: Ref. Chem. (1976) 49, 17.
- [13] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Element-spiral.svg>
- [14] [http://www.visual-literacy.org/periodic\\_table/periodic\\_table.html](http://www.visual-literacy.org/periodic_table/periodic_table.html)
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s\\_thermo-dynamic\\_surface](http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_thermo-dynamic_surface)
- [16] M. Rukeyser, Willard Gibbs: American Genius, Ok Bow Press, Woodbridge, CT, 1942.
- [17] [http://en.wikipedia.org/wiki/Mercator\\_projection](http://en.wikipedia.org/wiki/Mercator_projection), [http://scimaps.org/maps/map/maps\\_of\\_science\\_fore\\_50](http://scimaps.org/maps/map/maps_of_science_fore_50)
- [18] <http://www.wired.com/wiredscience/2009/03/mapof-science/>
- [19] <http://archive.sciencewatch.com/dr/rfm/mos/09julmosCHE/#36>
- [20] K. W. Boyack, K. Börner, R. Klavans, Mapping the Structure and Evolution of Chemistry Research, Proc. 11th Int. Conf. Scientometrics, Informetrics, Madrid, 2007. 112-123.

# Gutenbergtől egy új kémiáig?

## 3D nyomtatás és nyomtatók térben és időben

### Előszó

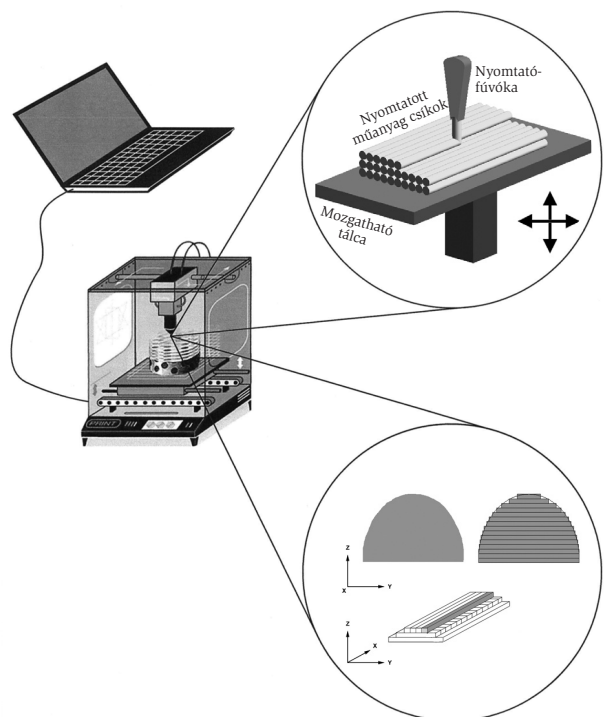
*Johannes Gutenberg* ha élne, mosolygós elégedettséggel szemlélhetné és állapíthatná meg találmánya, a nyomtatás évezredes „karrierjét” és azt, hogy még mindig velünk van és egyre intenzívebben használjuk a 21. század elején is. Pedig az elektronikus rögzítés által nem kis veszély fenyegette az előző évszázad során, amikor egyre erélyesebben húzták meg fölötte és a könyvkiadás fölött a vészharangot. Talán leghallhatóbban akkor, amikor a kanadai *Marshall McLuhan* 1962-ben közzétette *The Gutenberg Galaxy. The Making of the Typographic Man* című, a nyomtatás kultúrtörténetét eredeti módon jellemző, de a könyvnyomtatás végét is előre látó keserű, óriási sikerű bestsellerét. E téma részletes elemzése is biztosan megérne egy misét, de jelen munkának nem tárgya. Annnyira azonban mégis, hogy talán a technikafejlődés nézőpontja mentén Gutenberg korszakalkotó találmányát egydimenziós nyomtatásként tarthatnánk számon, amit logikus értelemben követett a kétdimenziós, majd a 20. század végén a háromdimenziós nyomtatás, amivel kimondottan vegyész szemmel foglalkozunk a következőkben.

### Bevezetés

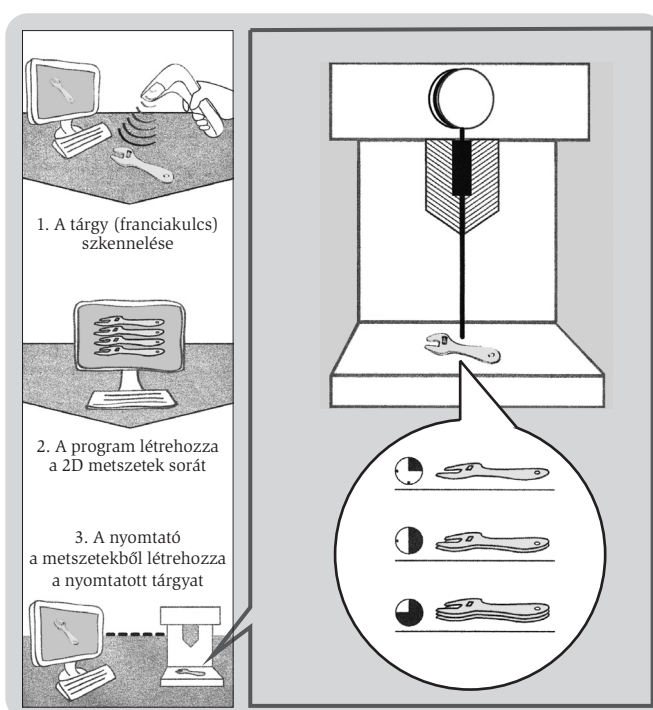
A 3D (háromdimenziós) nyomtatás rétegről rétegre való egymásra építésből hoz létre háromdimenziós (térbeli) tárgyakat. Ezen rétegek mindegyike a létrehozandó tárgy egy-egy vékony, vízszintes szelete. Minden 3D-ben nyomtatott tárgyat digitális CAD (computer aided design – számítógépes tervező) program alkot meg (**1. ábra**). A 3D modellezéshez szkennert is használhatunk: a **2. ábrán** például egy franciakulcs szkennelését, illetve kinyomtatását látjuk. Ahhoz, hogy a képfájl eljusson azokig az utasításokig, amiket a 3D nyomtató megért, a tervezőprogram a létrehozandó tárgy, ez esetben a franciakulcs képét több száz vagy több ezer vízszintes réteggé szelheti. A 3D nyomtató olvassa ezt a fájlt és a specifikáció alapján létrehozza a rétegeket, illetve megépíti a kívánt tárgyat [1], ami különleges bonyolultságú is lehet (**3. ábra**).

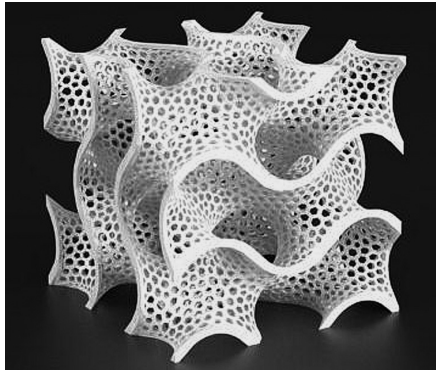
Az egyszerű 2D nyomtató a fűvókából tinta- vagy festékvonalakból álló rajzot, ábrát vagy betűket nyomtat egy papír felületére. A 3D nyomtató tinta helyett, hasonló fűvókából, például tetszőleges vastagságú műanyag csíkokat nyomtat. Ezek megfelelő,

1. ábra. 3D nyomtató és számítógép

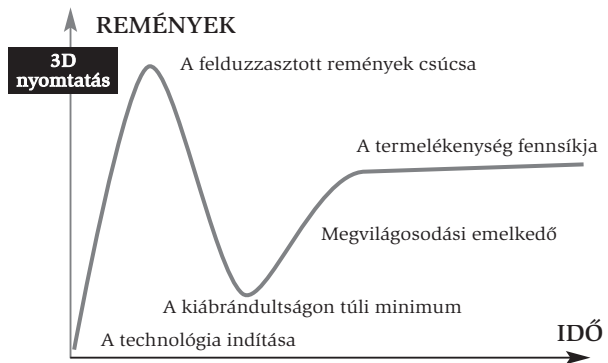


2. ábra. Olvasztott műanyag szállal működő 3D nyomtató





3. ábra. 3D nyomtatással készített, bonyolult geometriájú tárgy



4. ábra. A Gartner-ciklus [11]

egyidejű kezeléssel (például melegítés, lézer- vagy UV-sugárzás) megkeményednek, és úgy rétegeződnek, hogy a nyomtatandó háromdimenziós tárgy sima felületét hozzák létre. A rétegek (csíkok) állhatnak tehát valamilyen extrudálható vagy olvadó műanyagból, de szórófejből vagy fúvókából szórt fémporból is, ami színterezhető, vagy kerámiaporból, amit szintén külön szórófejből adagolt kötőanyag fog össze. Mivel a 3D nyomtatás anyagok, rétegek egymásra építésével hoz létre tárgyakat, additív (hozzáadásos) építésnek, előállításnak, gyártásnak is nevezik. Ezt felfoghatjuk a szubsztraktív előállítás ellentétéként, ahol például egy tömbszerű tárgyból kifaragással (esztergálással) alakítják ki a kívánt 3D tárgyat. Hasonlatként megemlíthető Henry Moore neves angol szobrász mondása: minden kőben benne van a szobor, csak le kell róla fejteni a felesleget.

## Előzmények, fejlődés, remények

A 3D nyomtatás feltalálását az amerikai Charles Hullnak tulajdonítják. Hull szabadalma 1986. március 11-én jelent meg. Ezután 3D nyomtatók gyártására Hull megalapította 3D Systems nevű vállalkozását, és 1988-ban SLA-250 néven piacra dobta a világ első 3D nyomtatóját.

A Hull-féle berendezést követően a szintén amerikai Scott Crump 1988-ban feltalálta a 3D nyomtatáshoz a *Fused Deposition Modelling (FDM)* és a *Selective Laser Sintering (SLS)* technológiákat és azok forgalmazására létrehozta a *Stratasyst* nevű vállalatot. Nem soroljuk tovább azokat a 3D nyomtatókat létrehozó cégeket, amelyek 1986 és 2013 között az Egyesült Államokban és más országokban létrejöttek [2]. Ezek után a 3D nyomtatók gyártása és használata világszerte jelentős fejlődésnek indult. 2008 és 2012 között az eladott nyomtatók száma exponenciálisan növekedett, miközben az asztali méretű egyszerűbb típusok ára ugyancsak exponenciálisan csökkent, illetve feleződött, és piacfelmérések szerint 2018-ban a 3D nyomtatók körülbelül egy PC-nél vagy laptopnál is olcsóbbak lehetnek [4,5]. Az asztali 3D nyomtatók gyártása és forgalmazása emlékeztet a személyi számítógépek 1970-es évekbeli elterjedésére [3].

## Értékelés és jövőkép

Nehéz megtalálni a józan értékeléshez vezető utat a 3D nyomtatást és nyomtatókat kísérő óriási nemzetközi érdeklődés közepette. A visszafogottságát gyakran bizonyító *New Scientist* szerint: „This will change everything. 3D printing technology will revolutionise the way we live our lives.” (Ez mindent megváltoztat. A 3D nyomtatási technológia forradalmasítja életünket.) A világszerte megszülető technológiákat értékelő és elemző amerikai Gartner cég [7, 11, 12] „túlzás és remény ciklus”-nak (Gartner Hype Cycle) nevezett metodológiát és grafikont javasolt az új technológiákat és újításokat kísérő, gyakran előforduló túllelkésedés, kiábrándulás és esetleges siker értékelésére (4. ábra). A Gartner-ciklus a vizsgált új technológiáknak a médiában való feltűnését és előfordulását használja indikátorként. A ciklus „a technológia indításaként” a sajtóban való gyakori megjelenést és az azt kísérő érdeklődést tekinti. „A felduzzasztott remények csúcsa” jelzi, hogy a publicitás túllelkésedést és nem realisztikus reményeket hoz létre. Ezen a szakaszon fordul elő a legtöbb kudarc és csalódás. „A kiábrándultságon túli minimumhoz” azok a fejlesztések kerülnek, amelyek nem tudnak megfelelni a várakozásoknak, és a média nem foglalkozik velük többet. A médiahallgatás ellenére egyes technológiák továbbfejlődnek és híruk emelkedni kezd. Egy technológia akkor jut el „a termelékenység fennsíkjára”, amikor haszna végleg bebizonyosodik, és gazdaságilag, illetve üzletileg is megbízható stabilitást mutat.

Úgy tűnik, hogy a Gartner-féle vizsgálat valamelyest alábecsülte a 3D nyomtatás fejlődését, sebességét és jelentőségét. Ezt nemcsak az mutatja, hogy amikor jelen dolgozat szerzője az Interneten rákeresett a „3D printing” szópárra, 220 millió találatot kapott, hanem az is, hogy a „megvilágosodási emelkedés” a vártnál meredekebbnek bizonyult 2012 után.

Az amerikai Phoenixben rendezett *Siemens Global Innovation Summit* konferencián (2013) Paul Brody [8], az IBM egyik igazgatója szerint a 3D nyomtatás nemcsak eszköz, hanem feltörekvő ökoszisztéma. A 3D nyomtatásról Brody külön kiemelte, hogy gyorsan eléri azt a teljesítmény-színvonalat, ami ahhoz szükséges, hogy készen álljon a termelésre; már most használják a gyár-



## Gutenbergtől egy új kémiáig?

tásban (az orvosi műszerek és a légiközlekedés esetében); a teljesítménye évről évre javul; kisebb térfogatú tárgyaknál az egységnyi árak versenyképesek a szubsztraktív megmunkálással és a fröccsöntéses műanyaggyártással.

Mindezeket megerősíti az a hír is, hogy 2012 augusztusában Obama elnök személyesen jelentett be egy 30 millió dolláros befektetési projektet a youngstowni (Ohio) *Nemzeti Additív Gyártási Innovációs Intézet* létrehozására [9]. A Gardner-ciklushoz visszatérve megemlítendő, hogy a „Manufacturing the future. 10 trends to come in 3D printing” (A jövő gyártása. A 3D nyomtatásban megvalósuló 10 trend) ausztrál prognosztika [10] kiemelt fontosságúnak ítélte a 3D nyomtatást és nyomtatókat.

### 3D nyomtatók

Az előbbiekben említettük, hogy ennek a dolgozatnak sem célja, sem tárgya a 3D nyomtatók [13–18] részletes műszaki leírása, illetve bemutatása. Néhány fotója azért látható a cikk végén, és megemlítjük, hogy jelen pillanatban a világ számos országában nagyszámú cég gyárt és forgalmaz ilyen berendezéseket. Ezek ára gyártótól, típustól, felhasznált anyagtól függően jelenleg körülbelül 800 és 20 000 USD között váltakozik. Nemrégén száznál több 3D nyomtatót; típusokat, gyártókat és árakat is tartalmazó nagyon hasznos összeállítást is közzétettek [18].

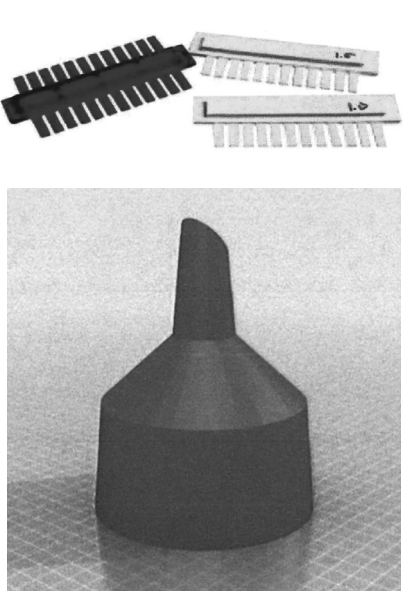
Amint említettük, a 3D nyomtatókat számítógép, illetve a megoldandó feladathoz szükséges CAD szoftver vezérli. Ez utóbbi egyrészt a kereskedelembe megvásárolható, másrészt „free open source software (FOSS)” termékként díjmentesen hozzáférhető. A FOSS-szal együttműködő hardver, például az Arduino [20] is figyelmet érdemel. Amennyiben a kívánság, vagy feladat egy meglévő tárgy, alkatrész, idom 3D nyomtatásban való másolása, úgy ezt, mint már említettük, szkennelssel kell letapogatni.

### Kémia és 3D nyomtatás

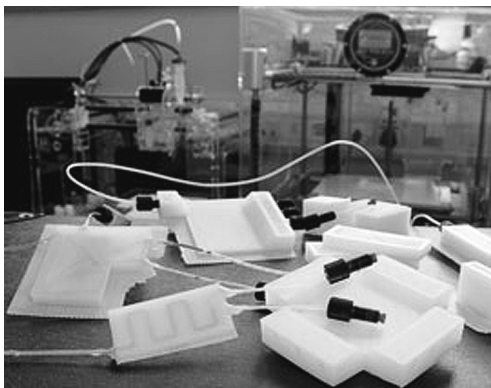
Jelenleg a 3D nyomtatás három kémiai alkalmazásáról tudunk. Az elsőben megfelelő műanyagból (például akrilnitrilből, butilsztirolból, politejsavból, polisztirolból, teflonból stb.) kémiai laboratóriumi edényeket és más eszközöket nyomtatnak, illetve építenek. A másodikban, ami a szerző szerint a kémia szemszögéből valószínűleg a legforradalmibb alkalmazás, nem valamilyen szilárd tárgy, anyag létrehozására, hanem számítógéppel programozott pipettaként (fecskendőként) több folyadék („nyomtatási tinta”) reakcióedénybe való adagolására, elegyítésére használják a 3D nyomtatókat, kémiai szintézisek érdekében. A harmadikban a 3D nyomtató ehető (élelmiszer-kémiai) termékeket (élelmiszereket) nyomtat. Sőt, van olyan alkalmazás is, amely sejteket, illetve sejtkomponenseket, biológiai adalékokat nyomtat (bioprinting), bizonyos élelmészeti reményekkel, például hús előállítására. Ezekkel a továbbiakban külön-külön foglalkozunk.

### Laboreszközök 3D nyomtatása

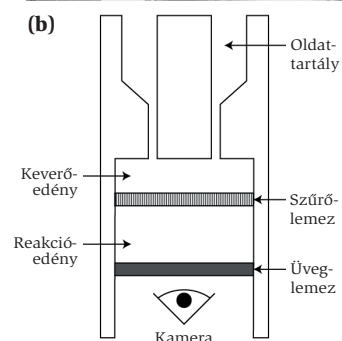
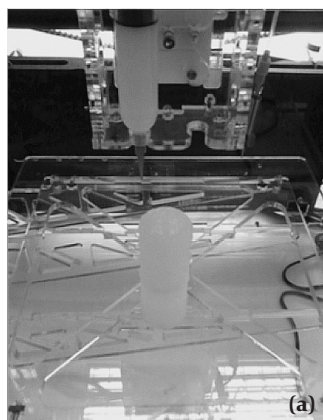
A kémiai, biokémiai, biológiai, klinikai laboratóriumokban tízezer számra használnak különböző formájú, méretű edényeket és ezekből épített berendezéseket. Ezek az edények 3D nyomtatóval, FOSS segítségével bármilyen méretben, formában, falvastagságban elkészíthetők. Bizonyították, hogy célszerűen beszerzett 3D nyomtatóval vagy nyomtatókkal teljes laboratóriumok szerelhetők fel a szükséges laborárukból. Sőt, olyan edények, eszközök nyomtathatók, amelyekbe üvegből vagy más anyagokból például ablakok, szelepek, elektródok is beépíthetők. Az **5. ábra** egyszerű, nyomtatott laboratóriumi eszközöket mutat be [21–25]. De bonyolultabbak is nyomtathatók. A **6. ábrán** bemutatott, műanyagból kinyomtatott mikrofluidikai elemek felhasználá-



**5. ábra.** 3D nyomtatással készült: elektroforézishez használt műanyag fésű [21], Büchner-tölcsér [23], küvetttartó állvány [22]



**6. ábra.** 3D nyomtatott mikrofluidikai reakcióedények [28]



7. ábra. Laboratóriumi edényt nyomtató berendezés (a). Loctite 5366 polimerből készített reakcióedény (b) [30]

sával, pumpákkal működtetett áramlásos rendszerben megvalósították imin, szekunder és tercier amin, sőt, a  $\{Mo_{36}\}$ ,  $\{Mo_{154}\}$  és aranyanorészecskék szintézisét is [28].

### 3D nyomtatások, kémiai szintézis

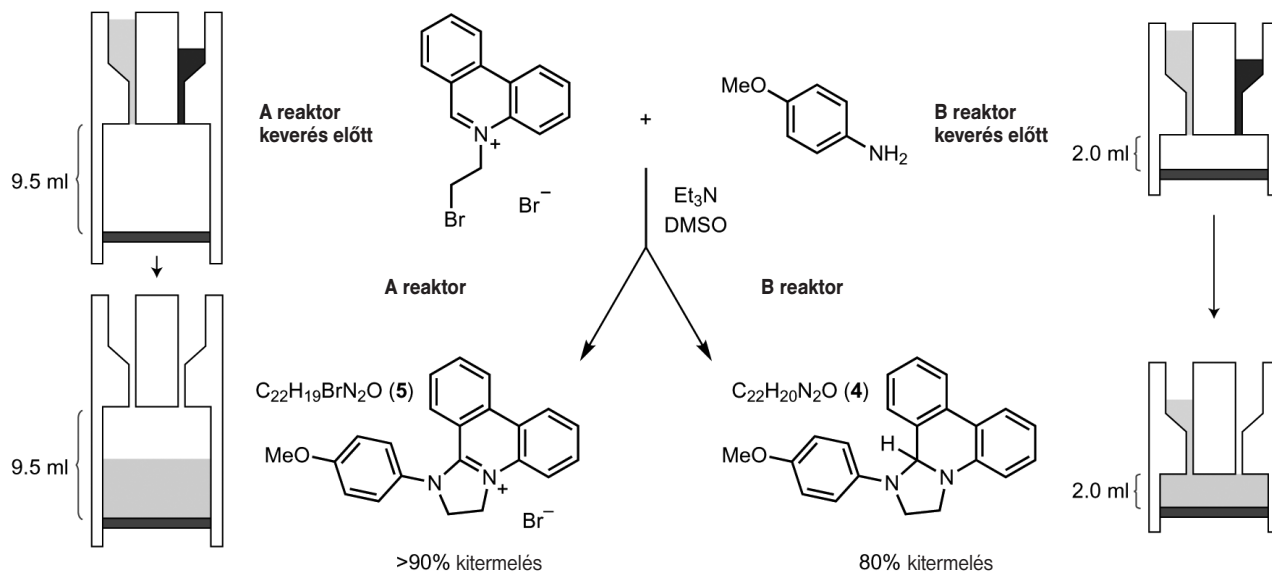
Megfelelő 3D nyomtatóval, gyorsan keményedő műanyagból (acetilszilikon polimer, Loctite 5300 fürdőszobai ragasztó) és aránylag könnyen hozzáférhető FOSS szoftverrel tehát bármilyen formájú, idomú, méretű laborberendezés nyomtatható, előállítható. De ha már kinyomtattuk a berendezést, miért ne nyomtassuk (fecskendezzük) bele a megfelelő reagenseket, vegyületeket [29]? Ehhez a nyomtató fűvókáit pipettaként, fecskendőként használhatjuk, a szoftverrel vezérelve. A programozás a folyadékok (tinták) térfogatának, a befecskendezés sebességének, a hőmérséklet változtatásával számtalan lehetőséget biztosít a kémiai szintézis legjobb körülményeinek kialakítására. Szinte már semmiségnek tűnik az a lehetőség, hogy az edények falába, nyomtatásuk közben, katalizátorok is bevihetők. Ezzel, nyugodtan állíthatjuk, teljesen új kémiához jutottunk, ami számtalan lehetőséget kínál.

A most vázolt berendezést szerves és szervetlen kémiai szintézisek esetében is alkalmazták. A szervetlennél egy nanoklasztert szintetizáltak úgy, hogy műanyagból pótlólag kinyomtattak egy szűrőlapot és üveglapot is magába foglaló reakcióedényt (7. ábra). A nyomtató egyik fecskendőjéből  $CoCl_2$ -oldatot fecskendeztek a reakcióedényben előzőleg elkészített  $[Se_2W_{19}O_{67}(H_2O)]^{12-}$ -oldathoz. A két oldatot a reakcióedényből vákuumszivattyúhoz csatolt és a reakcióedény falán átszűrt injekciós tűvel a programvezérlés átszívta a reakcióedényébe. A tű eltávolítása után a műanyag fal újra bezárult. A bekövetkező kristályosodást az üveglap mögött elhelyezett, különböző időpontokra programozott videokamera felvette. 60 perc után a műanyag reakcióedényt sebési szikével kettévágták, és a kialakult kristályokat röntgenkrisztallográfián, FTIR-rel, termogravimetrián és elemanalízissel vizsgálták. Az előállított vegyület klasszikus, szendvics típusú anionos klasztert  $-[W_{10}Co_2O_6Cl(SeO_3)_2(H_2O)_2]^9-$  tartalmazott [30, 31].

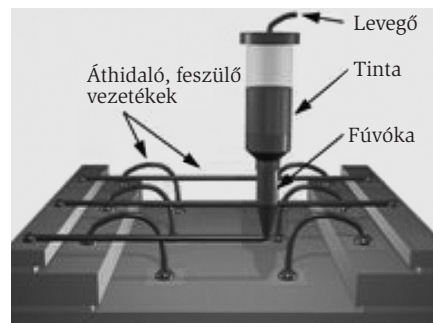
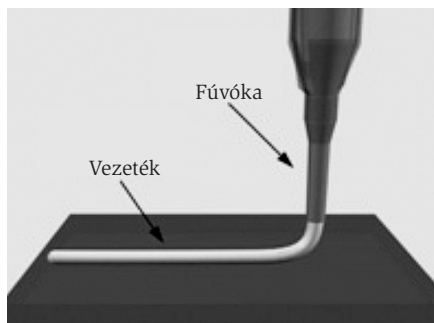
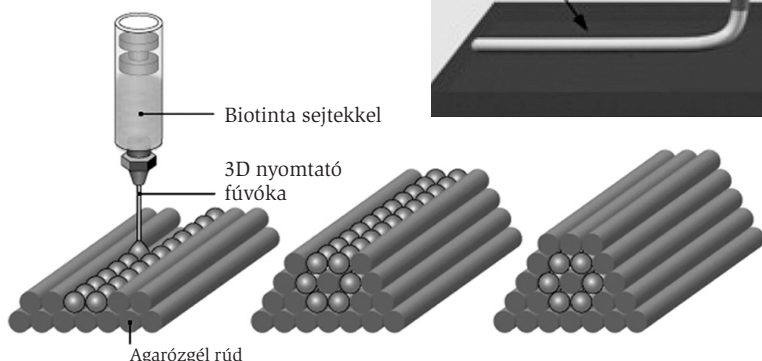
Nem árt még egyszer hangsúlyozni, illetve kiemelni azokat a lehetőségeket [30], amelyeket a kémiai 3D nyomtatás – lényegében számítógép által programozott reagensadagolás (pipetázás) és 3D nyomtatással készült reaktorok, reakcióedények, formák, méretek szinergetikus szinkronba helyezése – nyit meg a kémia előtt. A reaktorok, edények geometriai kialakítási lehetősége és a reaktánsok programozott találkozása még innovatívabb utakat kínál.

Az elmondottak illusztrálására szolgál a következő szerves kémiai szintézis (8. ábra). Az itt nyomtatott műanyag edény [30] lényegében ugyanaz, mint a 7.b ábrán bemutatott azzal a különbséggel, hogy nem építettek bele szűrőlapot. A reakcióban egy ekvivalens 4-metoxiani-

8. ábra.  $C_{22}H_{20}O(4)$  és  $C_{22}H_{19}BrN_2O(5)$  szelektív szintézise 3D nyomtatott reakcióedényekben [30]. Az A reaktor esetében mindkét reagens teljes mennyisége belefolyik az alsó kamrába. A B reaktorban bizonyos mennyiségű 5-(2-brómetil)-fenantridin-bromid-oldat reagálatlan marad a keveredés után a reakcióedény kisebb mérete következtében



9. ábra. Rugalmas poliakrilsav-ezüst nanorészecske-kompozitból 3D nyomtatott elektromos huzalok [32]



10. ábra. Mesterséges izomszövet 3D nyomtatása

lint reagáltattak DMSO-ban oldott három ekvivalens 5-(2-brómetil)-fenantridinium-bromid-dal  $\text{Et}_3\text{N}$ -feleslegében [31]. Az A reaktor két fecskendőjében az oldatok térfogata 4,7 ml, az alsó edényrész 9,5 ml térfogatú volt. A szoftverrel tervezett edénytérfo-gatok úrtartalma és a nyomtatott edények végleges úrtartalma között 5%-on belül volt a különbség. A B reaktorban az oldattérfogat mindkét esetben 2,0 ml volt. A reakció kimenetelét jelentősen meghatározta a két reaktor térfogatkülönbsége. Az A reaktor ese-tében mindkét reagenst teljes egészében belefecskendezték az alsó kamrába. A B reaktorban bizonyos mennyiségű 5-(2-bróm-etil) fenantridinium-bromid-oldat keverés után reagálatlan maradt a reakciókamra kisebb térfogatának következményeként.

### 3D nyomtatott huzalok

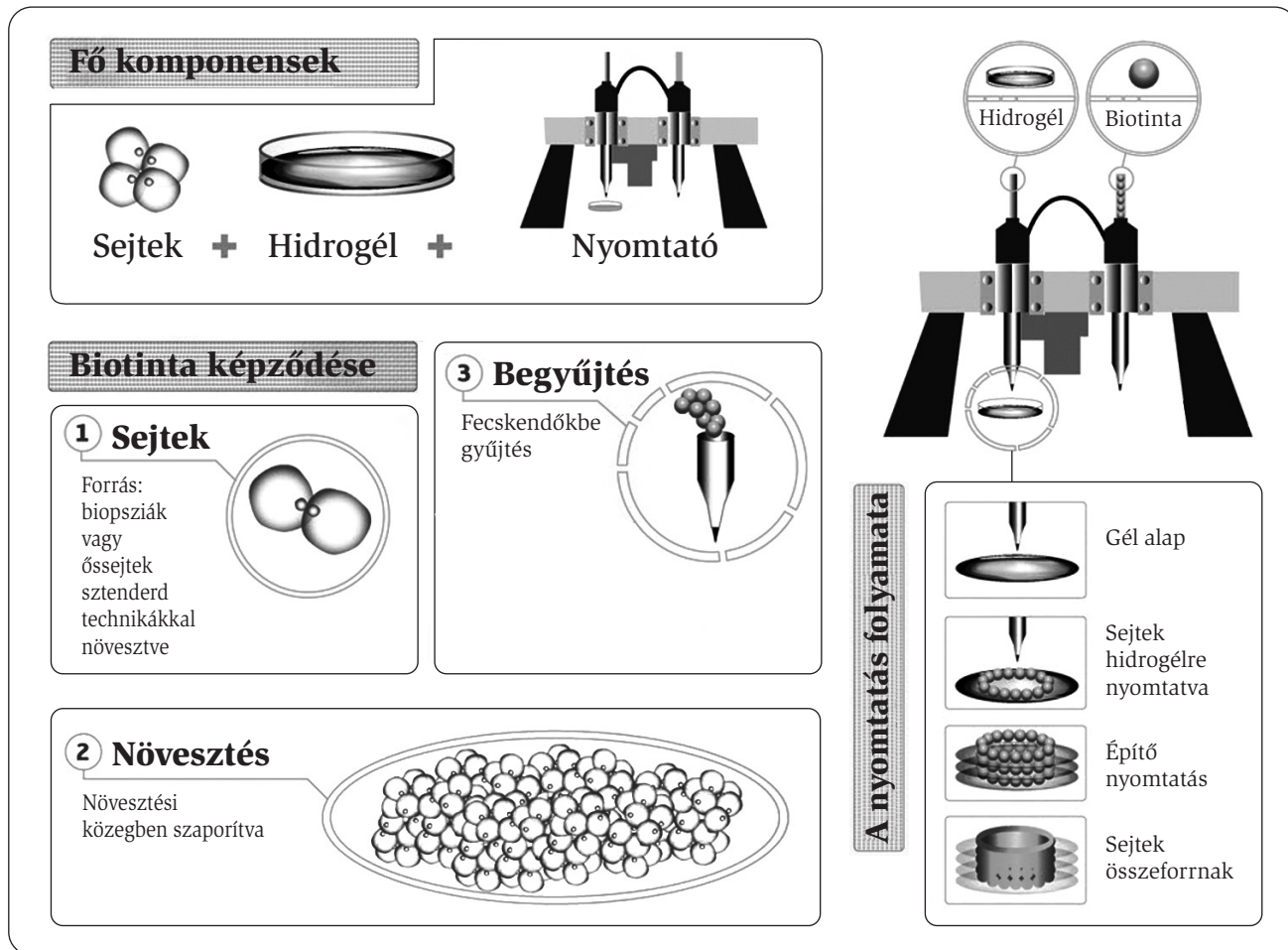
Elektronikus, optoelektronikus és orvosi berendezésekben a vezetékek, huzalok sűrű erdejével találkozunk. Ezek elhelyezése, vezetése számos nehézséget von maga után. Az ilyen huzalozások gyors, egyszerű és olcsó megoldására érdekes megoldást ja-vasoltak [32]. A huzalokat 5000 és 50 000 relatív molekulatömegű poliakrilsav, dietanolamid és ezüst-nanorészecskékből ösz-szeállított keverék tintából (pasztából) nyomtatták 3D nyomtatóval a kívánt felületekre (9. ábra). A huzalok vastagságát a 3D fúvókák nyílásának méretével tudták szabályozni.

Hasonló gondolatmenetbe illik egy 3D nyomtatással megvalósított elektrokémiai fejlesztés is: olyan akkumulátorokat kíván-nak előállítani, amelyek 20%-kal több energiát képesek tárolni, mint a jelenleg használt típusok. Több energiát tároló akkumu-látor több lítiumionot tartalmazó, nagyobb katódot igényel. Azonban a vastagabb katódba nem tudnak elég mélyen behatolni a lítiumionok. Ez csökkenti az akkumulátor energiasűrűségét, „erejét” és lomha gyorsuláshoz vezet. A PARC laboratórium [33] úgy szeretne ezen javítani, hogy két anyagból készíti a katódot. Az egyik sűrű és tárolásra van optimalizálva, a másik pórusos, hogy gyorsítsa a töltés átvitelét. Ezáltal széles tárolórégiók váltakoznak keskeny vezetőrégiókkal. Ez lehetővé teszi a nagyobb, ener-giadúsabb akkumulátorok építését. A kutatók a két anyagot szerves anyagba keverik és egy 3D nyomtató fúvókás fecskendőjébe töltik úgy, hogy párhuzamos, vékony csíkokat nyomtassanak egy fémlapra – mintha fogpasztát nyomnának ki. Száradás közben a csíkokból elpárolog a szerves anyag, maga után hagyva a szilárd katódot. További fejlesztésként teljes nyomtatott akkumulá-torok építését is tervezik. Ez öt tinta (paszta) nyomtatását igényli, kettő-kettő anódként és katódként, és egy elválasztóként mű-ködik. Az együtt nyomtatás ígéretesnek tűnik napelemek teljesítményének a növelésére is – ilyenkor ezüstpasztából nyomtatnak vékony ezüstvezetéseket. A pasztásításhoz olyan szerves anyagot használnak, amely a melegítéskor elég. Így 50  $\mu\text{m}$ -es huzalok helyett 20  $\mu\text{m}$  átmérőjűek hozhatók létre; ezek kisebb árnyékot vetnek, ezáltal több napfényt érheti a cellát [33].

### 3D nyomtatás – élelmiszer-kémia

Két irányban is folynak 3D nyomtatásos kutatások az élelmiszerek terén. Az elsőben pürésített húsokból, halakból, zöldegek-ből, valamint gyümölcsökből hoznak létre olyan nyomtatott egyedi vagy keverék idomokat, amelyeket másképpen nem lehetsé-ges megvalósítani, és amelyek a nyomtatásos formázás után sűrűsíthetők, grillezhetők vagy főzhetők formájuk megtartásával. E célra általában transzaminázt kevernek a nyomtatott püréhez.

A másik irány a fenténél talán még érdekesebb: mesterséges húskészítmények előállítását célozza 3D nyomtatással. Az állat-világ kímélése érdekében az emberiség fejlődése során aránylag régen felmerült az állati húshoz hasonló étkezési igényeket ki-elégítő mesterséges hús előállításának a gondolata. Ez annyiban is bonyolult feladat, amennyiben a hús nem teljes egészében tekinthető izomsejtek együttesének, hanem tartalmaz zsírt, kötőszövetet és más sejtyszerű komponenseket, amelyek jelentősen hozzájárulnak ízéhez és textúrájához.



11. ábra. 3D nyomtatott, őssejtből előállított ér, petricsészába helyezett hidrogélen

A 2011 októberében San Diegóban megrendezett TEDMED konferencián bemutatták azt a készítményt, amely a mesterséges hús előfutárának is tekinthető [35, 36]. A kérdéssel komoly ráfordítások árán is foglalkoznak [37]. A 3D nyomtatással előállított húskészítmények témája átvezet egy olyan területre, nevezetesen a 3D bionyomtatásra (bioprinting), amellyel ez a dolgozat nem kíván foglalkozni – csak annyiban, amennyiben a 3D nyomtatott hús kérdését illeti. Példaként megemlíthető a 10. ábrán bemutatott izomszövet 3D bioprintelése agaróz és őssejtekből álló biotinta felhasználásával [38].

Az Egyesült Államokban magyar származású apa-fiú kutatópár által létesített *Modern Meadow* vállalkozásról [39] a közel-múltbeli a *Google Solve for X* konferencián számoltak be, ahol sertésből vett biopsziából kiindulva képzelik el a 3D printeléssel előállított hús útját. Ugyanők egy másik, *Organovo* nevű vállalkozásukban mesterséges szervek, például erek építéséhez hidrogélekre nyomtatnak őssejteket (11. ábra).

## Zárszó

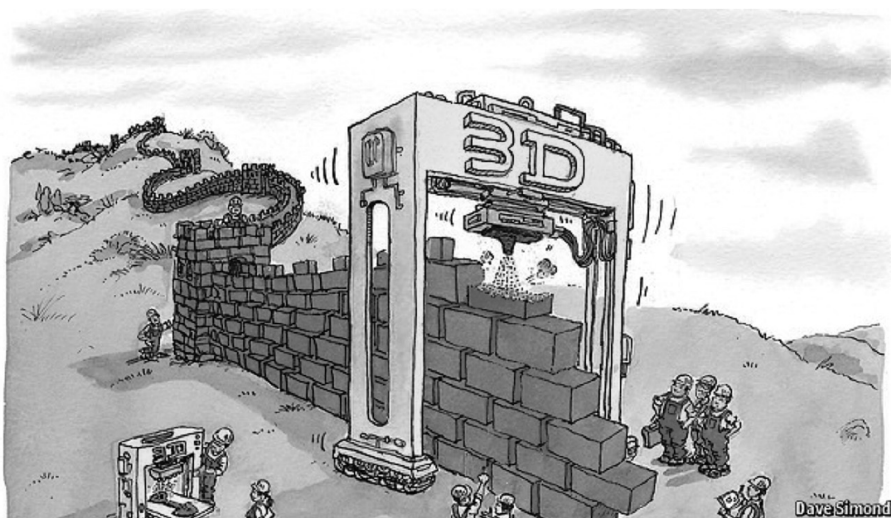
Amennyiben a 3D nyomtatás és nyomtatók, valamint a vezérlő szoftverek fejlődése abban a ritmusban és azzal a sebességgel fejlődik és folytatódik, mint az utóbbi körülbelül 2 évben, akkor valóban közel van az az idő, amikor minden háztartás, laboratórium, iroda asztalán a számítógép és 2D nyomtató mellett megjelenik a 3D nyomtató valamelyik változata, ami műanyag tárgyak, de a további fejlődés során élelmiszerek, sőt kerámia-, illetve fémtárgyak saját kezű előállítását szolgálhatja.

Ez vonatkozik persze a középiskolai oktatásra is, ahol a gyerekek kíváncsiságát, alkotó érdeklődését jelentősen stimulálhatja egy önállóan működtethető 3D nyomtató. A kiemelkedően innovatív „3D nyomtatásos kémia” csak az aránylag közeljövőben, jelen szerző szerint az elkövetkező körülbelül egy évtized során igazolhatja létjogosultságát és kibontakozásban lévő átfogóan széles körű potenciálját.

Az IBM-et képviselő Paul Brody [8] és Obama elnök [9] hangsúlyos megnyilvánulása a 3D nyomtatás jövőjét illetően nemcsak figyelemre méltó, hanem döntően meggyőző és iránymutató lehet az emberi fejlődés műszaki jövője szempontjából. Ezek mellett, sőt ezeken felülemelkedve nyomós érv lehet a fentiek alátámasztására az a mondat, amit talán nem lehet tömörebben megfogalmazni, mint hogy „a kínaiak már a spájzban vannak”. Ezt nem lehet jobban bizonyítani, illetve illusztrálni, mint ahogy a 12. ábrán szerepel. [41]



## Gutenbergről egy új kériáig?



12. ábra. A kínaiak már a spájzban vannak

## IRODALOM

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_printing](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing)
- [2] <http://www.3d-innovations.com/blog/?p=373>
- [3] H. Lipson, M. Kurman, Factory@Home. The Emerging Economy of Personal Manufacturing. One of a Series of Occasional Papers in Science and Technology, <http://www.handelsblatt.com/technologie/it-tk/it-internet/3d-druck-die-revolution-wird-abgeblasen/7817508.html>, <http://www.thingiverse.com/thing:370>
- [4] <http://www.3dprinter.net/rise-of-3d-printing-exponential>
- [5] CISCO
- [6] New Scientist (2011) 30 July.
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/Gartner>
- [8] <http://on3dprinting.com/2013/03/21/ibm-sees-exponential-growth-of-3d-printing-ind...>
- [9] <http://www.3ders.org/articles/20120816-white-house-announced-new-manufacturing-...>
- [10] <http://www.forbes.com/sites/ciocentral/2012/12/07/manufacturing-the-future-10-trends-to-come-in-3d-printing/>
- [11] [http://www.google.hu/search?q=Gartner+Hype+Cycle+for+Emerging+Technologies.gif&hl=en&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=f89aUe\\_4CaT74QSVII](http://www.google.hu/search?q=Gartner+Hype+Cycle+for+Emerging+Technologies.gif&hl=en&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=f89aUe_4CaT74QSVII)  
[GQCw&ved=0CDQQAQ&biw=1280&bih=886#imgref=aTvCfJXmMZkOOM%3A%3BdQ5ghz239TbcCM%3Bhttp%253A%252F%252Fupload.wikimedia.org%252Fwiki](http://www.google.hu/search?q=Gartner+Hype+Cycle+for+Emerging+Technologies.gif&hl=en&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=f89aUe_4CaT74QSVII)  
[kikipedia%252Fcommons%252Ff1%252Ff1%252FGartner\\_Hype\\_Cycle\\_for\\_Emerging\\_Technologies.gif%3Bhttp%253A%252F%252Fcommons.wikimedia.org%252Fwiki](http://www.google.hu/search?q=Gartner+Hype+Cycle+for+Emerging+Technologies.gif&hl=en&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=f89aUe_4CaT74QSVII)  
[ki%252FFile%253AGartner\\_Hype\\_Cycle\\_for\\_Emerging\\_Technologies.gif%3B610%3B531](http://www.google.hu/search?q=Gartner+Hype+Cycle+for+Emerging+Technologies.gif&hl=en&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=f89aUe_4CaT74QSVII)
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gartner\\_Hype\\_Cycle.srg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Gartner_Hype_Cycle.srg)
- [13] [http://repraphai.com/index.php?route=product/product&product\\_id=50](http://repraphai.com/index.php?route=product/product&product_id=50)
- [14] <http://www.3dstuffmaker.com/evolution-3d-printer/>
- [15] [http://www.reprap.org/wiki/Mendel\\_Build\\_Manual](http://www.reprap.org/wiki/Mendel_Build_Manual)
- [16] <http://www.nagyformatumu.hu/hu/3d-nyomtato/rapman-32-3d-nyomtato-epitokeszlet>
- [17] <http://discovermagazine.com/2013/jan-feb/19-3-d-printers-make-every-home-a-factory#.UXYR36KeNfY>
- [18] <http://www.3dstuffmaker.com/images/classicprusad.jpg>
- [19] <http://www.3ders.org/pricecompare/3dprinters>
- [20] <http://www.arduino.cc/>
- [21] <http://cen.acs.org/articles/91/i7/3-D-Printers-Move-Research.html>
- [22] <http://www.thingiverse.com/thing:25080>
- [23] <http://www.thingiverse.com/thing:25188>
- [24] <http://www.thingiverse.com/thing:11621>
- [25] Braun Tibor, Magyar Kémikusok Lapja (2012), 67.
- [26] <http://www.sciencemag.org/context/337/6100/1303/F1.large.jpg>
- [27] <http://www.rsc.org/chemistryworld/2012/08/3d-printed-miniaturized-fluidic-devices>
- [28] P. Y. Kitson, M. L. Rosnes, V. Sans, V. Dragone, L. Cronin, Lab-on-a-Chip (2012) 238, 3267.
- [29] K. Sanderson, New Scientist (2012) 21 April.
- [30] M. D. Symes, Ph. J. Kitson, Jun Yan, C. J. Richmond, G. J. T. Cooper, R. W. Bowman, P. Vilbrandt, L. Cronin, Nature Chemistry (2012) 4, 349.
- [31] A. D. Parenty, L. V. Smith, A. L. Pickering, D.-L. Long, L. Cronin, J. Org. Chem. (2004) 69, 5934.
- [32] Bok Yeop Ahn, S. B. Walker, S. C. Slimmer, A. Ruso, S. Kranz, E. D. Duoso, F. F. Malkowski, J. A. Lewis, J. Vis. Exp. (2011) 58, 3189.
- [33] <http://www.pcworld.com/article/2030320/parc-redesigns-printers-to-produce-solar-panels-batteries.html>
- [34] <http://eativmashines.cornell.edu/node/194>
- [35] <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscript/2010-08-Lipton.pdf>
- [36] <http://www.inc.com/john-mcdermott/big-ideas/modern-meadow-in-vitro-meat.html>
- [37] <http://www.geek.com/news/sartup-gets-350k-in-funding-to-3d-print-meat-1509683>
- [38] V. S. Balakrishnan, Lab Times (2013) 2, 24.
- [39] <http://3dprintingindustry.com/2013/03/07/update-andreas-forgacs-on-3d-printed-meat/>
- [40] <http://www.3ders.org/articles/20120730-gabor-forgacs-scientific-founder-of-organovo-recognized-for-pioneering-work-in-bioprinting.html>
- [41] The Economist, April 27, 2013. <http://www.economist.com/news/science-and-technology/21576626-additive-manufacturing-growing-apace-china-new-brick-great-wall>

# 4D nyomtatás és önépítés alakemlékező polimerekkel

## Előszó

Kissé vissza- vagy hátralépve valószínűleg hasznos, ha a 3D nyomtatásra emlékezünk. A háromdimenziós (3D) nyomtatás rétegről rétegre való egymásra építésből hoz létre háromdimenziós (térbeli) tárgyakat. A rétegek mindegyike a létrehozandó tárgy (idom) egy-egy vékony szelete (csíkja). Minden 3D-ben nyomtatott tárgyat digitális CAD (*Computer Aided Design* - számítógépes tervező) program alkot meg. Ahhoz, hogy a CAD-fájl eljusson az utasításokig, amiket a 3D-nyomtató megért, a tervezőprogram a létrehozandó tárgy képét több száz, vagy több ezer vízszintes réteggé szeleteli. A 3D nyomtató olvassa a fájlt és a specifikáció alapján létrehozza, illetve megépíti a kívánt tárgyat. Mivel a 3D nyomtatás anyagok, rétegek egymásra építésével hoz létre tárgyakat, *additív* (hozzáadásos) építésnek, előállításnak, gyártásnak is nevezik. Ezt felfoghatjuk a *szubsztraktív* előállítás ellentétéleként, ahol például egy tömbszerű anyagból kifaragással, lehántolással (például esztergálással) alakítják ki a kívánt tárgyat.

Az előzőekben a 3D nyomtatás és nyomtatók három alkalmazásáról számoltunk be [1]. Az elsőben megfelelő, hőre lágyuló polimerekből (például akrilnitrilből, butilsztirolból, politejsavból, polisztirolból, teflonból stb.) tárgyakat, laboratóriumi és más eszközöket nyomtatnak, illetve építenek, de lehetséges fém- és/vagy kerámiaporokból olvasztással is rétegeket, illetve tárgyakat nyomtatni. A másodikban nem valamilyen szilárd tárgy, anyag létrehozására, hanem számítógéppel programozott pipettaként (fecskendőként) több folyadék („nyomtatási tinta”) reakcióedénybe, vagy edényekbe való adagolására, elegyítésére használják a 3D nyomtatókat, kémiai szintézisek érdekében. A harmadikban a 3D nyomtató étkezési alapanyagokból ehető (élelmiszer-kémiai) termékeket (élelmiszereket) nyomtat. Sőt, van olyan alkalmazás is, amely sejteket, sejtkomponenseket, biológiai adalékokat nyomtat (bioprinting), bizonyos biológiai, illetve élelmezési reményekkel kecsegtető anyagok (például mesterséges izom), mesterséges hús előállítására.

Itt kell most hangsúlyoznunk, hogy jelen dolgozatban a fent említett alkalmazások közül csak az elsővel foglalkozunk egy, a következőkben ismertetett, továbbfejlesztett változatban.

## Bevezetés

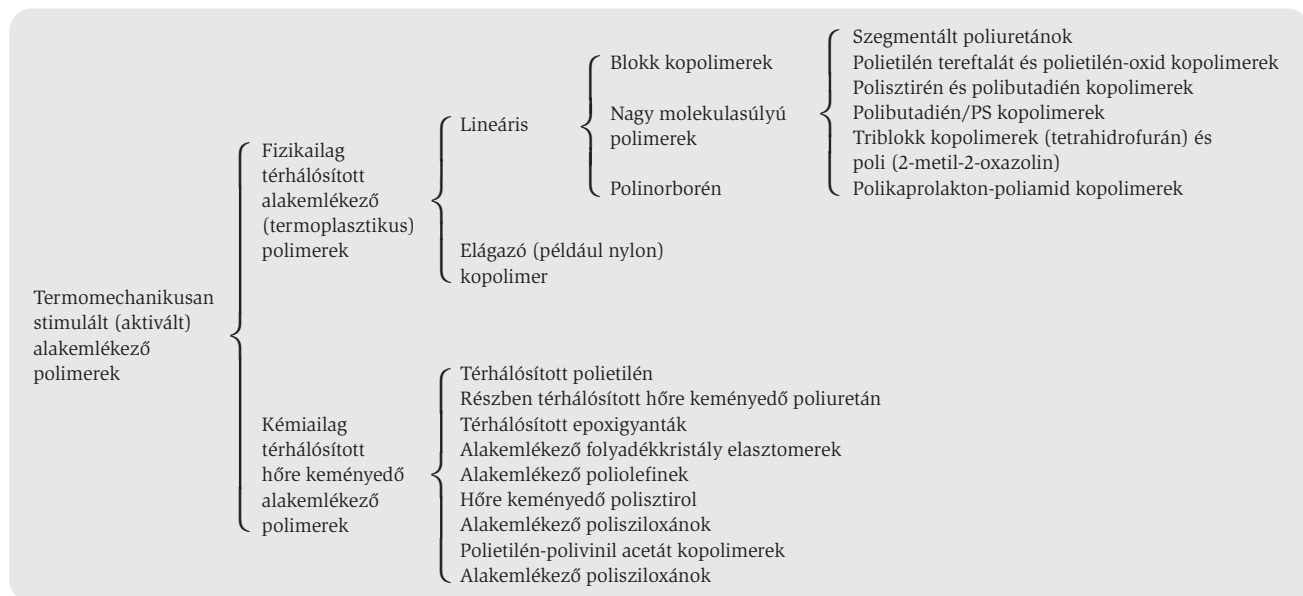
Az angol nyelvben *self-assembly*-nek nevezett fogalom definíciószerűen olyan folyamatot takar, amiben meglévő komponensekből álló rendezetlen rendszerből rendezett áll elő a komponensek közötti specifikus, lokális kölcsönhatások következtében [2]. Sajnos, jelen szerző nem találta a *self-assembly* magyar nyelvű megfelelőjét, de amennyiben azt *önépítésnek* fordítjuk, akkor a 4D nyomtatást tekinthetjük annak kezdeti előfutárjának.

A 3D nyomtatás negyedik dimenziója (4D) az anyagok azon képességére vonatkozik, ami szerint nyomtatásuk után programozottan alakot és funkciót tudnak változtatni, ezáltal a terméket járulékos, teljesítményvezérelt, például önépítő képességekkel látják el. Képzeljünk el egy olyan eljárást, amiben szilárd anyagok, például műanyagok 3D-s egymásra rétegeltsége alapján tárgyak morfológizálódhatnak, s a változó külső körülményekre adott válaszul (ilyen körülmény lehet a hőmérséklet, a nyomás, az elektromos feszültség, a mágnesesség, a nedvesség, a fény), előre programozott egyéni vezérlettel új alakot és tulajdonságokat vehetnek fel.

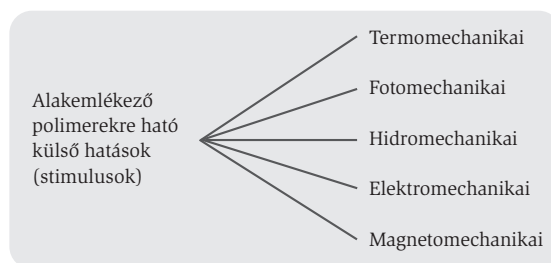
A fentiek szerint programozható anyagnak (*Programmable Matter, PM*) [3] nevezik a tudományban azt a mérnöki és tervezési területet, ami a (kémiai) anyag azon programozható képességével foglalkozik, ami, mint említettük, megváltoztathatja az anyag formáját és/vagy funkcióját (tehát formáját, sűrűségét, moduluszait, vezetőképeségét, színét stb.). Ezen belül ki kell emelnünk az „alakemlékező polimerek”-et (*Shape-memory polymers*) [4] (**1. táblázat**). Ezúttal olyan értelmes (smart) polimerekről van szó, amik képesek külső stimulus (például hőmérséklet) hatására alakot változtatni, majd külső vezérlésre állandó alakjukhoz visszatérni. A továbbiakban a köznap és ezen polimerek 3D-s egymásra nyomtatásával, illetve természetével és tipológiájával és a fent említett külső hatások (stimulusok) válfajaival (**2. táblázat**) és hatásaival foglalkozunk. A téma szakirodalma jelentős méretű, így helyhiány miatt általában egyedi példákat említünk a polimerek és a stimulusok vonatkozásában. Azonban feltétlenül meg kell említenünk egy kitűnő hazai összefoglalót az alakemlékező polimerekről [5].

Talán az érdekesség és bizonyosfajta rokonítás kedvéért érdemes említést tenni, már csak azért is, mert a 4D nyomtatás a 3D nyomtatású hagyományos polimerek és alakemlékező polimerek egymásra nyomtatott lapjainak vagy szálainak programozott hajtogatása, illetve alakváltozása útján jön létre, a világszerte ismert japán hagyományos *origami* papírhajtogatási technikáról, amit általában művészetként is említenek [6].

## 4D nyomtatás és önépítés alaklékező polimerekkel



1. táblázat. Alaklékező polimerek osztályozása [11]



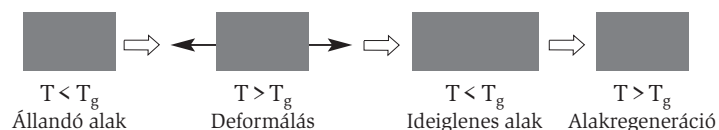
2. táblázat. Stimulusok fajtái

Az origami (折り紙) japán eredetű szó, egy japán papírhajtogatás, amiben nem polimereket, hanem papírlapokat hajtogatnak néha meglehetősen bonyolult, háromdimenziós (3D) alakra (1. ábra, a 40. oldal). Ez a tevékenység az 1600-as, vagy még korábbi években született, főleg Japánban, de Kínában, Olaszországban és Németországban is művelték és jelentős érdeklődést váltott ki művészeti és matematikai körökben az 1940-es és 50-es években.

## Nyomtatott alaklékező polimer komponensek alakváltozása külső stimulusok hatására

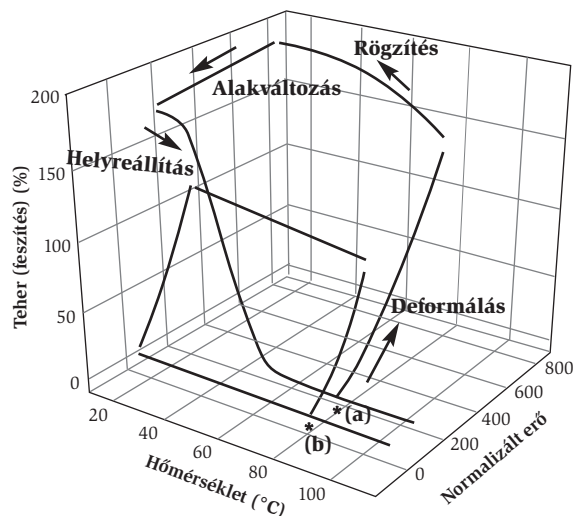
A nyomtatott alaklékező aktív polimer komponensek alakváltozási sémáját, például hőmérséklet hatására, a 2. és 3. ábra szemlélteti. A 3. ábrán az alaklékező ciklus 3D ábrázolása látható: a) alaklékező polimer, b) természetes gumi. A csillag a kísérlet startját jelzi (eredeti mintaméret, hőmérséklet és teher). Mindkét mintát (alaklékező polimer és gumi) állandó teherrel és hőmérsékletnél deformálták. A deformálási lépést állandó teher melletti hűtési lépés követte. Alacsony hőmérsékletnél a terhelés eltávolításánál az alakrögzítés megmaradt a polimernél, de rögtön helyreállt a guminál. Alakhelyreállítás a polimernél csak melegítésre következett be.

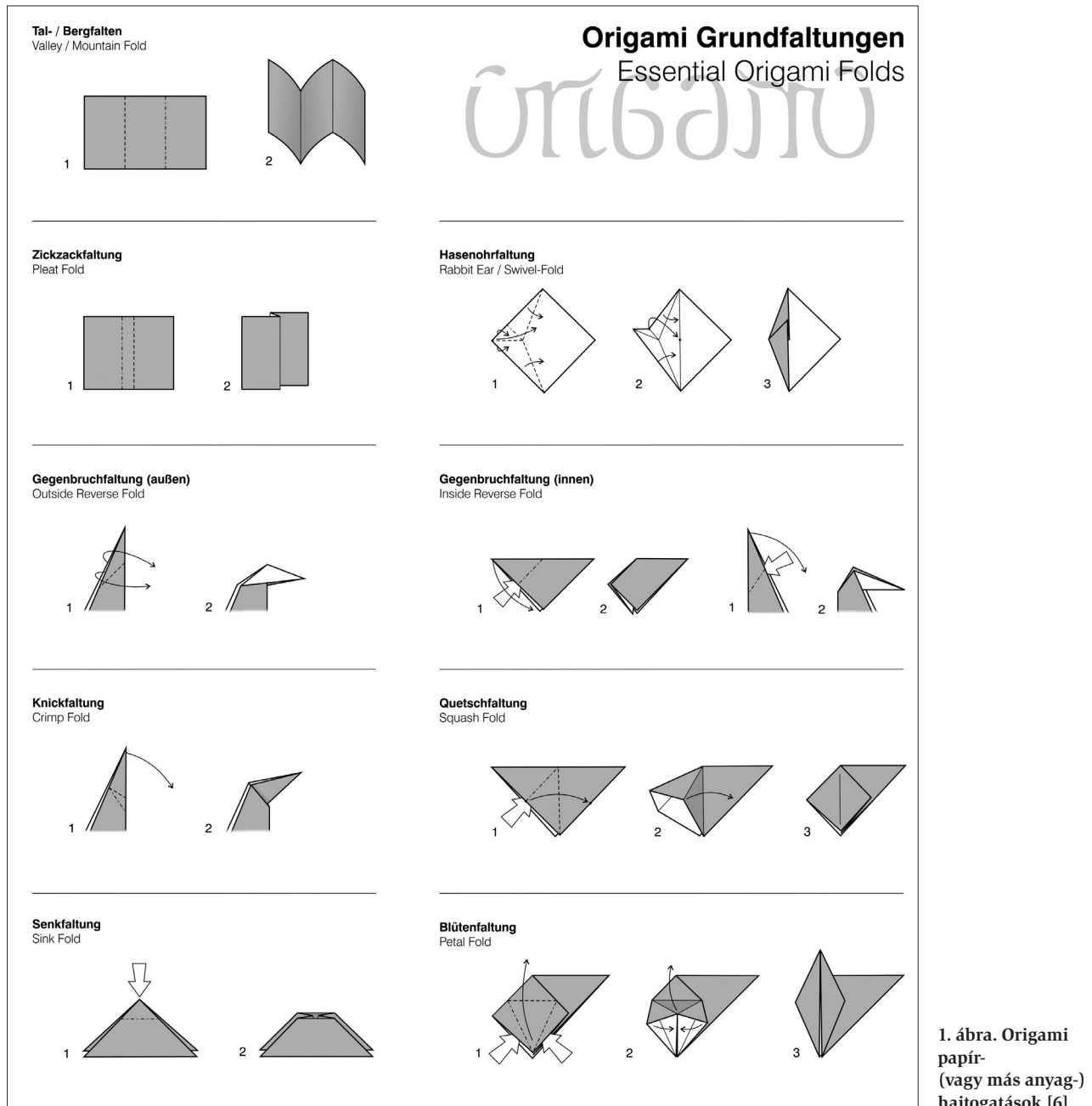
3. ábra. Az alaklékező ciklus 3D ábrázolása [8]



2. ábra. Nyomtatott alaklékező aktív polimerkomponensek alakváltozásának sémája [4]

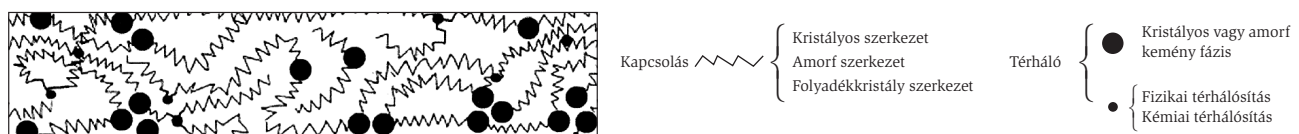
$T_g$ : üvegesedési átmeneti hőmérséklet





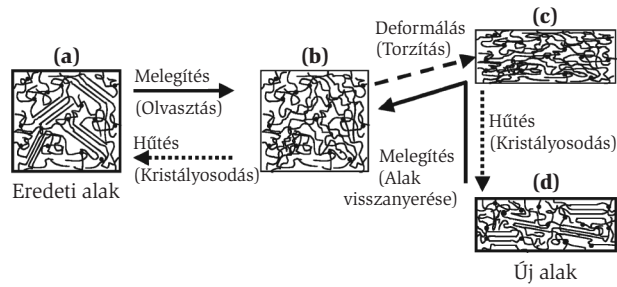
A 4. ábra az alaklélekező aktív polimer komponensek szerkezeti válfajait mutatja be [7]. Mint látható, ezek kémiai szerkezetek, általában fizikai térhálósított kristályos/amorf kemény fázisok (5. ábra), de lehetnek kémiai térhálósítottak és folyadékkristály fázisúak is. Valamelyik külső stimulus (például hőmérséklet, termomechanika) hatására változtatják alakjukat. Általában az eredeti alakban a belső feszültség nulla, vagy nagyon alacsony. Amikor az alaklélekező polimer deformálásnak, vagy torzításnak lesz kitéve, nagy belső feszültség tárolódik a térhálósított szerkezetben. Átmeneti hőmérsékletre való melegítésre vagy más stimulus hatására az alaklélekező polimerek visszatérnek állandó alakjukhoz a térhálósított szerkezetben tárolt belső feszültség felszabadulásával [8-10].

4. ábra. A termikusan befolyásolható, nyomtatott alaklélekező aktív polimer komponensek válfajai és szerkezete [7]



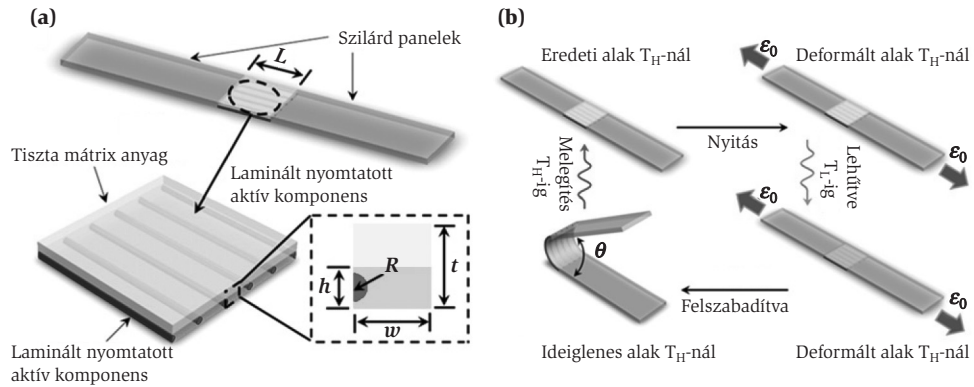


## 4D nyomtatás és önépítés alakemlékező polimerekkel



5. ábra. Félkristályos alakemlékező polimerek alakrögzítési és alak-visszanyerési mechanizmusa:

a) térhálós alak félkristályos állapotban (alacsony hőmérséklet),  
b) olvadt minta feszültségmentes állapotban (magas hőmérséklet),  
c) deformált állapot olvadt állapotban (magas hőmérséklet),  
d) kristály-fagyott deformált állapot (alacsony hőmérséklet) [8]



6. ábra. 3D nyomtatással nyomtatott merev és alakemlékező polimer kompozit zsanér (forgópánt) működése síklapon [9]:  
a) a nyomtatott polimer panelek,  
b) a panel melegítése, programozható összehajthatósága

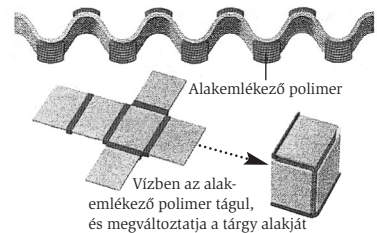
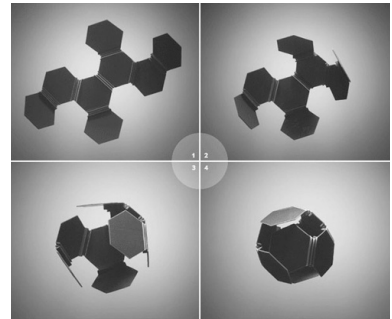
## Nyomtatott alakemlékező polimer komponensek alakváltozása vízbe mártás hatására

Mint említettük, 3D nyomtatással egymásra nyomtathatók alakállandó (merev vagy rugalmas) és alakemlékező polimerek, így például olyan önépítő összetételek hozhatók létre, amikben vízbe mártás után az alakemlékező polimer zsanérként (forgópántként) működik. Ilyen lehetőségeket mutat be a 6. és 7. ábra [10,11].

Vízbe vagy bizonyos oldószerekbe mártva az alakemlékező polimerek a víz- vagy oldószermolekulák a polimer vagy kompozitmintákba diffundálnak és lágyítóként hatnak, ezáltal a  $T_g$ -t (üvegesedési átmeneti hőmérsékletet) szobahőmérsékletre, vagy lejjebb csökkentik. Ez a nedvességfelvétel mértékétől, illetve az áztatási időtől függ. Így például a vízfelvétel 0 és 4,5% közötti szintjénél a  $T_g$ -csökkenés 0 és 35 K közöttinek felel meg. Például a poliuretán esetében 240 órás áztatás után körülbelül 4,5%, mivel a poliuretán még mindig polimernek és nem hidrogélnak tekinthető [12]. De alakemlékező polimerekként működhetnek a vízbe mártott poliuretán poliszilasoniszil-oxán blokk-kopolimerek is. Ez esetben az alacsony molekulásúlyú polietilén-glikol (PEG) működik poliéter-szegmensként. Vízbe mártva a PEG-szegmens feloldódik a kristályosodási hőmérséklet ( $T_m$ ) eltűnésével és az eredeti alak visszatérésével. Az alakemlékező folyamatokban kulcsszerepet játszik a hidrogénkötés is [12].

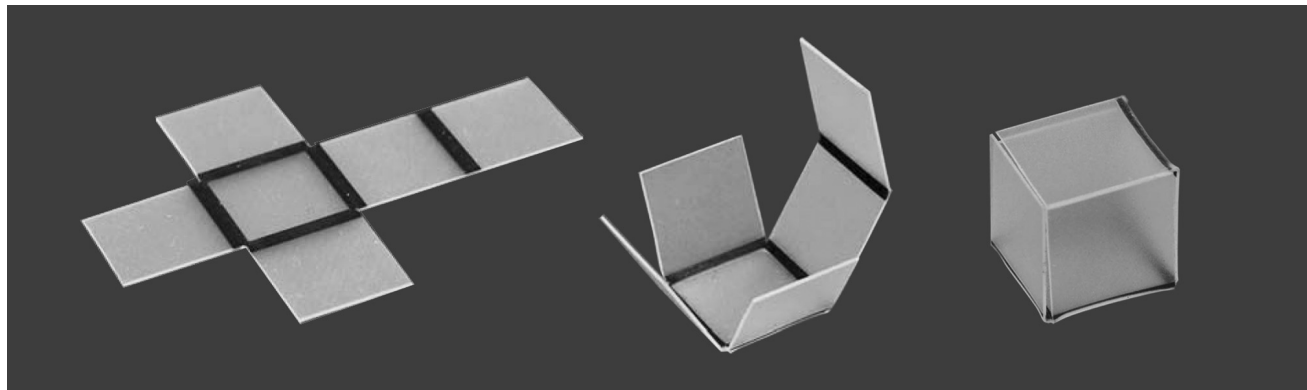
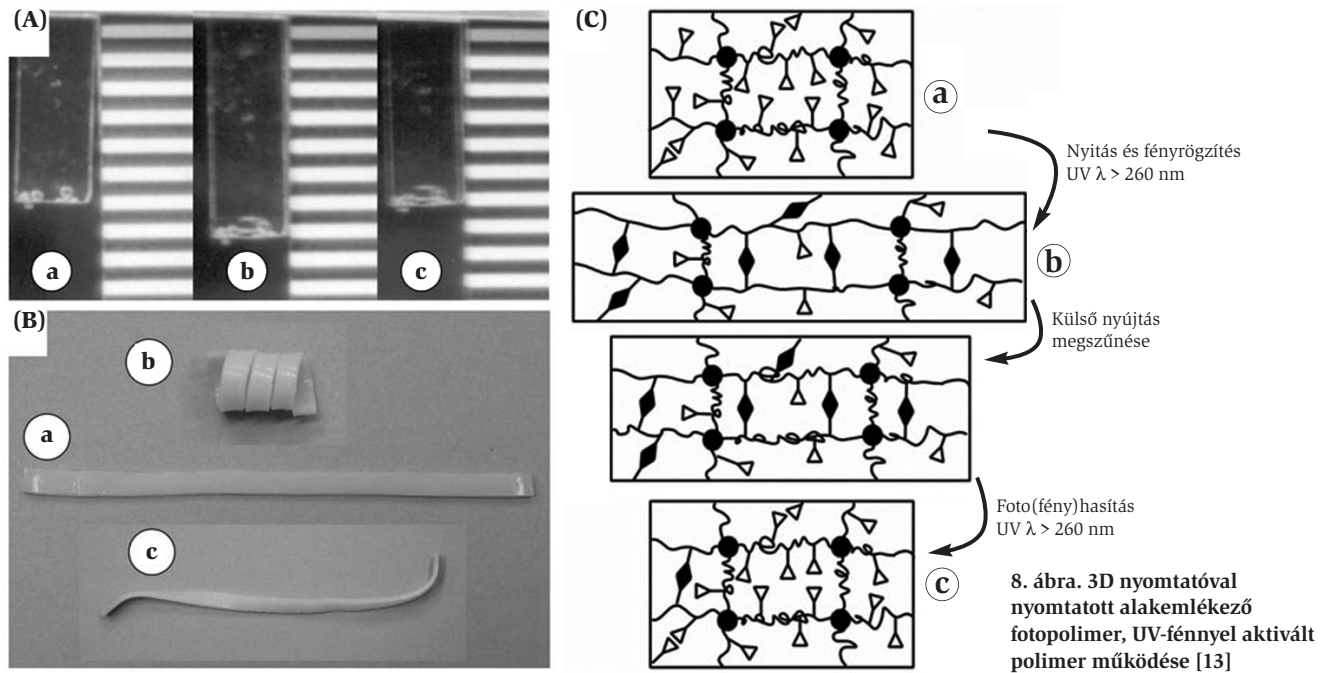
## Nyomtatott alakemlékező polimerkomponensek alakváltozása fény (fotomechanika) hatására

$\lambda$ -Ciano-metoxi-fahéjsav-csoportokat tartalmazó polimerek deformálhatók és rögzíthetők meghatározott (például megnyújtott film vagy cső) alakúra UV-megvilágítás hatására. Ezek az új alakok például 50 °C-ra melegítéskor hosszabb ideig is stabilak és más hullámhosszú UV-fény hatására szobahőmérsékleten visszanyerik eredeti alakjukat. Amint a 8. ábrán látható, a fotopolimer állandó film formájú (a), majd külső, 20%-os nyújtás után mindkét oldalát 60 percre 260 nm-es UV-fénnyel világítják meg. Amikor a külső nyújtást megszüntetik, a minta megmarad a nyújtott alakban (b). Újabb 60 perces megvilágítás 260 nm-nél nagyobb hullámhosszú UV-fénnyel az újonnan alakult fotellenállású térhálók hasadását okozza. Eredményként a film visszatér állandó alakjához (c). Hasonló módon más alakok is kialakíthatók. Ha például egy ilyen, 100 %-ra meg-



7. ábra. 3D nyomtatással nyomtatott merev és alakemlékező kompozit zsanér (forgópánt) működése kocka és oktaéder programozható önépítésnél [10]

## 4D nyomtatás és önépítés alakemlékező polimerekkel



9. ábra. 3D nyomtatóval nyomtatott fotopolimer fókuszátlan fénnyel aktivált origami-hajtogatása [14]

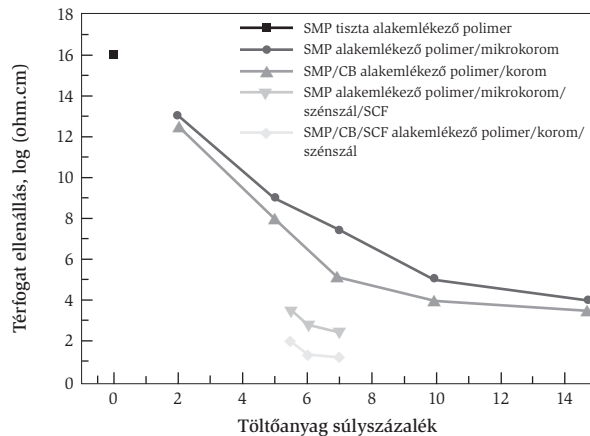
nyújtott polimer filmnek csak az egyik oldalát sugározzák be 60 percre 260 nm-nél nagyobb hullámhosszú UV-fénnyel, dugóhúzó alakú film képződik a külső nyújtás megszűnésekor (B) [13].

A fotomechanikai hatásnak egy másik változatát mutatja be a **9. ábra** fókuszátlan fény hatására kialakuló origamiszerű hajtogatás önépítés példáján. Az ábra síklapjai optikailag átlátszó előfeszített polisztirolból készültek. Ezek egyenlő melegítésre síkban zsugorodnak. A 3D nyomtatóval a szélekre felvitt fekete festékcsíkok lokalizált fényabszorpciót, illetve üvegátmeneti felmelegedést hoznak létre a polimerben. Ennél a hőmérsékletnél a fekete csíkok (mondhatjuk zsanérok) összehúzódnak és a síklapok háromdimenziós (kocka) alakúra való önépítő hajtogatását hozzák létre. Természetesen ahhoz, hogy a hajtogatás létrejöjjön, a zsanéros rész hőmérséklete meg kell, hogy haladjon a hajtogatott síklemezek  $T_g$  hőmérsékletét [14].

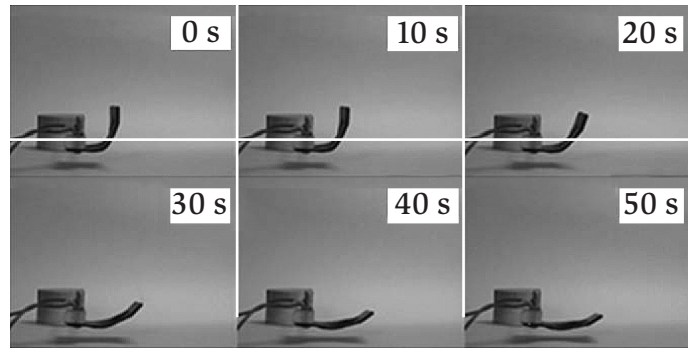
### Nyomtatott alakemlékező polimer komponensek alakváltozása elektromos feszültség hatására

Elektromosan vezető mikrorészecskéket keverve alakemlékező polimerekbe, ezek elektromosan vezetővé tehetők. Amikor elektromos áramot vezetnek be egy ilyen kompozitba, az előidézett joule-hő a kompozit belső hőmérsékletét a  $T_g$  fölé emelheti, ezáltal alak-visszaállítást idéz elő. A **10. ábra** aktív szénkorom részecskéikkel és rövid szénzással töltött alakemlékező polimer fajlagos ellenállását mutatja be a töltőanyagok mennyiségének függvényében. Mint látható, az 5,0 tömegszázalék korommal és 0,5 tömegszázalék szénzással töltött polimer térfogat-ellenállása 128,32 ohm-cm, ahol a szigetelő-vezető átmenet jelentkezik, addig az 5,0 tömegszázalék korom és 2,0 tömegszázalék szénzással tartalmazó kompozit ellenállása 2,32 ohm-cm, ami vezetőként jellemezhető. Egy ilyen 182,23,2-4 mm-es, 5,0 tömegszázalék korommal és 2,0 tömegszázalék szénzással töltött kompozit

## 4D nyomtatás és önépítés alakemlékező polimerekkel



10. ábra. Köröm-mikrorészecskékkel és szénsszákkal töltött alakváltozó kompozit polimer elektromos ellenállása az összetétel függvényében [15]



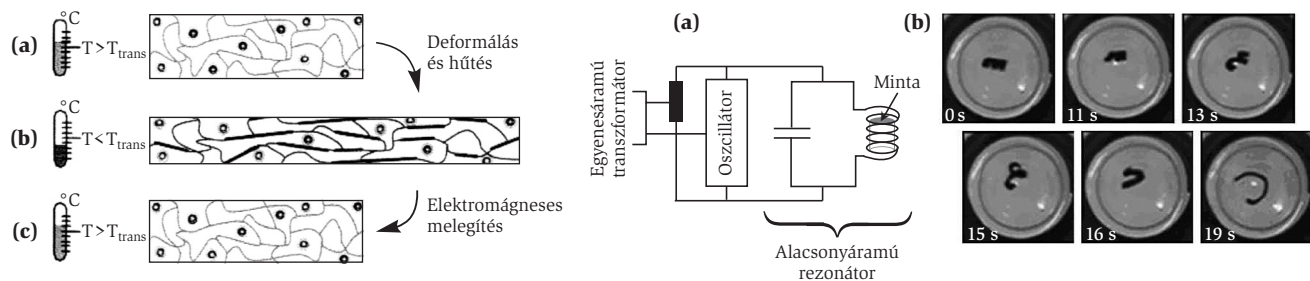
11. ábra. Köröm-mikrorészecskékkel és szénsszákkal töltött alakváltozó kompozitpolimer alakváltozása az idő függvényében 25 V feszültség hatására [15]

alakváltozását mutatja be a 11. ábra, ahol az alak az ideiglenes hajlítótól az eredeti sík alakig változik 50 másodperc alatt, 24 V-os feszültség hatására. Az alakváltozás sebessége erősen függ az alkalmazott feszültségtől és az alakváltozó kompozit elektromos ellenállásától [15].

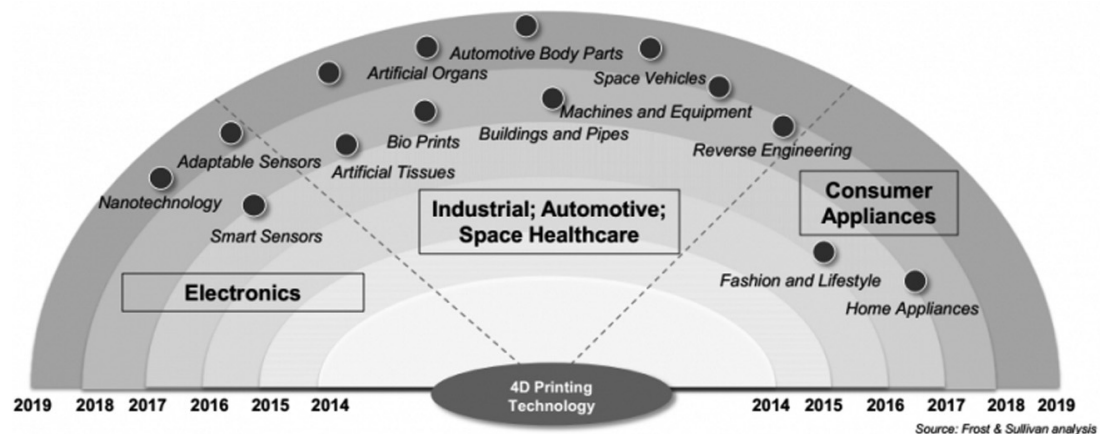
## Nyomtatott alakemlékező polimer komponensek alakváltozása mágneses erő hatására

Feromágneses töltőanyaggal mágneses erőt érzékelő alakemlékező polimereket is előállítottak, így például induktív melegítésre képes szuperparamágneses magnetit-részecskékkel ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $d \approx 11 \text{ nm}$ ). Egy magnetorezisztív alakemlékező minta elektromágneses programozását és alak-visszaváltozását mutatja be a 12. ábra. A minta állandó alakja meghatározható a polimerkompozit

12. ábra. Alakemlékező  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanorészecske-polimer alakváltozása elektromágneses melegítés hatására [16]



13. ábra. A 4D nyomtatás várható gyakorlati alkalmazási területei 2014 és 2019 között [20]

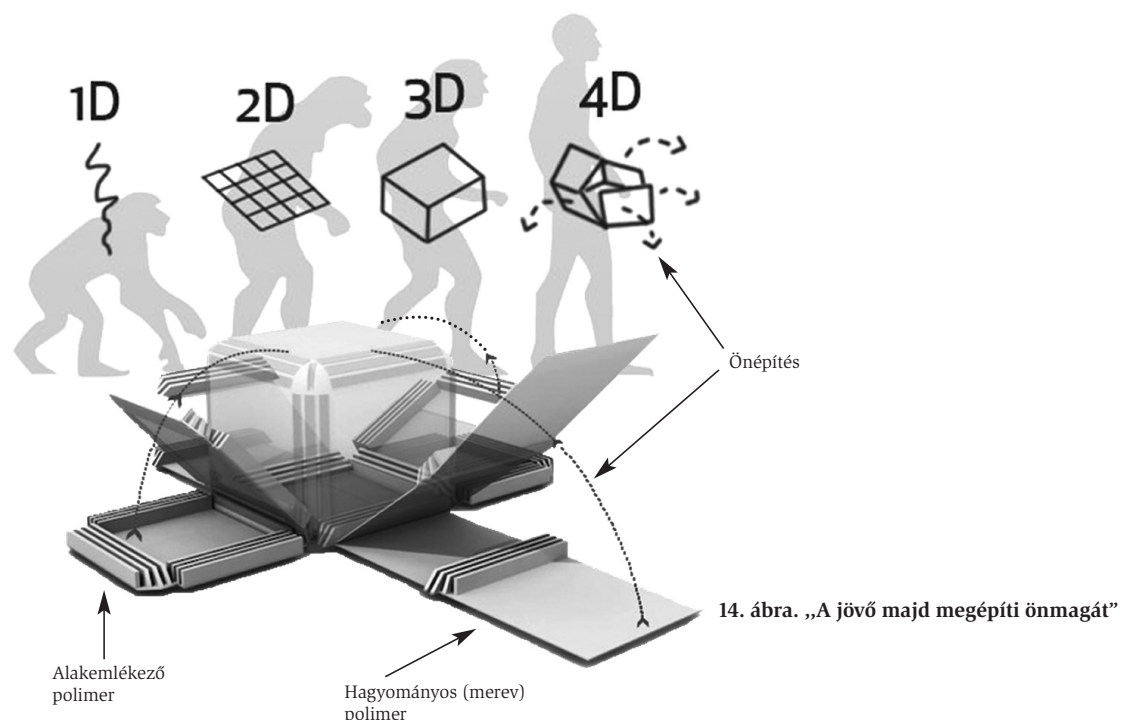


## 4D nyomtatás és önépítés alaklékező polimerekkel

szokásos hőformálásával. Ezután a minta deformálható (általában  $T-T_{\text{trans}}$ -nál, ahol  $T_{\text{trans}}$  az átalakulási hőmérséklet) és a hőmérséklet csökkentésével beállítható a kívánt átmeneti alakra. Ez fizikai térhálósításokként működő kristályok üveges fázisképzéséhez vezet. A hőérzékeny alakváltozó polimerek esetében az állandó alak a minta a  $T_g$ -n keresztüli inframelegítésével történik a polimer szegmensek elernyedésének hatására. A bemutatott példa esetében a  $T_g$ -t az oligo- ( $\epsilon$ -kaprolaton) kapcsolat szegmenseinek olvadási hőmérséklete határozza meg. A példában a nanokompozitok elektromágneses melegítését használják fel [16].

### Alkalmazások és epilógus

Talán a 4D nyomtatást a legtömörebben összefoglalva hivatkozhatunk egy angol nyelvű utalásra: *Essentially, it's 3D-printing with a fourth dimension of chameleon-like transformation* (lényegében a 4D nyomtatás a 3D nyomtatás kaméleonszerű negyedik dimenziós átalakulása) [17]. Sőt, ezt túl is licitálja a következő: *Forget the 3D printer: 4D printing could change everything* (felejtjük el a 3D-nyomtatót: a 4D-nyomtatás mindent megváltoztathat) [18]. Úgy tekintik, hogy a 4D nyomtatási technológia a különböző programozható anyagok [3], valamint jelenleg elsősorban az alaklékező polimerek [5] igénybevételével jelentős ipari alkalmazási lehetőségekkel rendelkezik: erre utal a 2014 és 2019 közötti periódust alapul véve a **13. ábra** [19]. Ezért mondhatják azok, akik nagyon optimisták hisznek az eljárás jövőjében jövőben: *The future will build itself* (a jövő majd megépíti önmagát) [20] (**14. ábra**).



### IRODALOM

- [1] Braun Tibor, *Gutenbergről egy új kémiaig? 3D nyomtatás és nyomtatók térben és időben*, Magy. Kém. Lapja (2013) 68, 338.
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Self-assembly>
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable\\_matter](http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_matter)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Shape-memory\\_polymer](http://en.wikipedia.org/wiki/Shape-memory_polymer)
- [5] Czifrák Katalin, Verner Erika, Karger-Kocsis József, Zsuga Miklós, Kéki Sándor, *Az alaklékező polimerekről napjainkban*, Műanyag és Gumi (2014) 51, 115.
- [6] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Origami>
- [7] Q. Heng, J. Hu., *A review of shape memory polymer composites and blends*, Composites Part A, Appl. Sci. Manuf. (2008) 40, 1661.
- [8] C. Liu, H. Qin, P. T. Mather, *Review of progress in shape-memory polymers*, J. Mater. Chem. (2007) 17, 1543.
- [9] Qi Ge, Conner K. Dunn, H. Jerry Qi, Martin L. Dunn, *Active origami by 4D printing*, Smart Mater. Struct. (2014) 23, 1.
- [10] T. A. Campbell, S. Tibbits, D. Garrett, *Programmable world*, Scient. Am. (2014) November, 44.
- [11] J. Leng, Y. Liu, S. Du, *Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications*, Progr. Mat. Sci. (2011) 56, 1077.
- [12] W. M. Huang, B. Yang, L. An, C. Li, Y. S. Chan, *Water-driven programmable polyurethane shape memory polymer: Demonstration and mechanism*, Appl. Phys. Lett. (2005) 86, 11405.
- [13] A. Lendlein, H. Jiang, O. Jünger, R. Langer, *Light-induced shape-memory polymers*, Nature (2005) 434, 879.
- [14] Y. Liu, J. K. Boyles, Jan Genzer, M. D. Dickey, *Self-folding of polymer sheets using local light absorption*, Soft Matter (2012) 8, 1764.
- [15] Y. Liu, H. Lv, X. Lan, J. Leng, S. Du, *Review of electro-active shape-memory polymer composite*, Comp. Sci. Technol. (2009) 89, 2064.
- [16] A. M. Schmidt, *Electromagnetic activation of shape memory polymer networks containing magnetic nanoparticles*, Macromol. Rapid Commun. (2006) 27, 1168.
- [17] <http://www.healthoutcomes.com/doc/d-printing-holds-special-potential-for-the-healthcare-industry-0001>
- [18] <http://www.smithsonianmag.com/innovation/Objects-That-Change-Shape-On-Their-Own-180951449/?no-ist>
- [19] <http://machinedesign.com/3d-printing/4d-printing-rise>
- [20] M. Reilly, S. Tibbits, *The future will build itself*, New Scientist (2013) November 9, 28.



# Empíriától a tudományig

## Molekuláris és szupramolekuláris gasztronómia<sup>1</sup>

### Bevezetés

Az elmúlt néhány évszázad során a tudomány óriási fejlődésen ment keresztül. Mindezek ellenére a rendelkezésre álló hatalmas tudás és szakértelem csak elenyésző mértékben hasznosodott a főzés és sütés tudományának megalapozásában. Ennek tudatában kíséreljük meg e dolgozatban azoknak az ismereteknek a körvonalazását, amelyek elindították a klasszikusnak nevezhető gasztronómiát a tudománynak tekinthető molekuláris gasztronómia felé vezető úton. Hasznosnak látszik, ha előbb a fogalmak definíciójával, majd az új tudományterület keletkezésével kezdjük. Gasztronómiának nevezzük az ételek, italok szakértő ismeretét, illetve élvezésük művészetét. De definiálják úgy is, mint az ételek, italok kifinomult élvezését és az étkezés művészetét, tágabb értelemben az étkezés kultúráját is.

„Az ízezés fízológájá” [1] című, 1825-ben publikált munkájával Jean Anthelm Brillat-Savarint tekintik a gasztronómiai irodalom úttörőjének. Szellemes kötetében kitűnő receptek váltakoznak anekdotákkal és eszmefuttatásokkal. Neki tulajdonítják a közismert mondást, miszerint *„egy új fogás felfedezése jobban hozzájárul az emberi faj boldogságához, mint egy új csillagé”,* sőt *„a mondd meg, mit eszel, és megmondom, ki vagy”* aforizmát is.

A történelem során a főzéshez empirikusan kialakított és az idő múlásával célszerűbben és kifinomultabban változtatott recepteket használtak a készítők (szakácsok, háziasszonyok stb.). Közismerten és humorosan szólva a nagymamák receptkönyvei voltak a konyha és konyhaművészet biblíái. Az ezekben található recepteket anélkül használták – és gyakorta használják ma is, néha meglepően sikeresen –, hogy az igénybevételük során történő kulináris változások mechanizmusával tisztában lettek volna. A fejlődés során idővel óhatatlanul felmerül a kérdés, hogy miért viselkednek úgy az élelmiszerek, ahogy, amikor bizonyos dolgokat tesznek velük. Az a tevékenység, amelyik a konyhai nyersanyagoktól az elkészült ételig vezető változások fizikai és kémiai mechanizmusát van hivatva megismerni, önálló tudományterületté, a molekuláris és jelen szerző véleménye szerint szupramolekuláris gasztronómiává fejlődött a legutóbbi körülbelül harminc év során. A molekuláris gasztronómia az a tudományterület, amelyik azt kívánja megismerni és hasznosítani, hogyan működik a főzés, sütés (cooking) a molekulák és szupramolekulák szintjén. Ugyanazon az alapon, amin a természettudomány a természeti jelenségek mechanizmusának, törvényszerűségeinek megismerésére törekszik. És ebben is követi Louis Pasteur közismert mondását: *„nem léteznek alkalmazott tudományok, csak a tudomány alkalmazása”*. Felmerül a kérdés, hogy akkor miért nem „molekuláris főzésnek” nevezzük. Egyszerű a válasz, mert a főzés jártasság, és nem tudomány. A molekuláris gasztronómia (MG) önálló tudományterületté vált, amelynek jelentősége messze meghaladja az egyszerű technológiai alkalmazást. Ezt az új területet nem az élelmiszertudománnyal kell azonosítani, amely az élelmiszerek előállításával, tulajdonságaival és viselkedésével foglalkozik.

A molekuláris gasztronómiáról kezdetei óta hatalmas méretű szakirodalom jelenik meg, ebből csak szemléltetésre sorolunk fel néhány művet [2–5].

Jelen írásban ízelítőül az MG által tanulmányozott néhány kiválasztott fizikai és kémiai folyamat és jelenség körvonalazásával foglalkozunk.

Alkotói szerint a fentieken túlmenően az MG még a következő nagyon jelentős alterületekre fókuszál:

1. A kulináris tevékenységhez kapcsolódó társadalmi jelenségekre.
2. A kulináris tevékenységek művészeti összetevőire.
3. A kulináris tevékenységek műszerezettségére.

Ezek részleteire azonban ez az írás nem terjedhet ki. Végül feltétlenül meg kell említenünk, hogy a molekuláris gasztronómia nagymértékű hatást gyakorolt a világ vezető konyhaséíjeinek gondolkodásmódjára és szakmai tevékenységére. Szerte a világon már számos étteremben találkozhatunk a molekuláris gasztronómia tudományát alkalmazó neves séfek ínyenc alkotásaival. Éttermeik rendkívül sikeresek, azokba igen nehéz bejutni, sokszor hónapokkal előre érdemes asztalt foglalni, olyan hatalmas a tudományos háttérű ínyenc ételköltemények iránti érdeklődés a nagyközönség részéről.

### A molekuláris gasztronómia tudományának előfutárai

Az időszámításunk előtti második században egy Londonban tárolt papirusz szerzője mérleget használt annak a megállapítására, hogy az erjesztett hús könnyebb-e, mint a friss hús. Azóta az idők folyamán számos tudós érdeklődött az ételek és a főzés, sütés iránt. Különösen a minőségi sűrített hús és a csontleves, azaz a vizes oldat, ami a hús és csont hőkezelése közben jön létre, ké-

<sup>1</sup> Az angol nyelvű „cooking” szónak nincs pontos magyar megfelelője. Ezért a dolgozatban fordításként a jelentés szerinti „sütés, főzés”-t használjuk.

## Empíriától a tudományig

pezte a legnagyobb érdeklődést. Apicius említette ezt először a negyedik évszázadban, de a húsleves készítéséhez részletes receptek jelentek meg klasszikus szövegekben és a legtöbb francia szakácskönyvben is. Vegyészek a 18. század óta érdeklődtek az élelmiszerek elkészítése iránt [6]. Antoine-Laurent de Lavoisier talán a leghíresebb közülük, 1783-ban a húsleves sűrűségmérését alkalmazta a minőség meghatározására. Kísérleteinek ismertetésekor írta Lavoisier, hogy *„akkor, amikor a legismertebb tárgyakat, a legegyszerűbb dolgokat tekintetbe vesszük, lehetetlen nem észrevenni és nem meglepve tapasztalni, mennyire bizonytalanok és megbízhatatlanok ismereteink és hogy következményként milyen fontos, hogy azokat kísérletekkel tényként rögzítsük”*. Szintén jelentős személyiség Rumford grófja, aki fizikusként a konyhai kultúra változásait tanulmányozta, és jobbításukra számos javaslatot és találmányt dolgozott ki, például egy különleges kávéfőzőt a kávé hatékonyabb kilúgozására.

A molekuláris gasztronómia tudományát talán Marie-Antoine Careme, a leghíresebb francia séfek egyike vélte előrelátni, amikor a 19. század elején leírta, hogy *„az erőleves forráspontját nagyon lassan kell elérni, mert különben az albumin koagulál, megkeményedik, és ezáltal megakadályozza az osmazom zselatinos részének a szétválását”*.

Említésre érdemes, hogy az osmazomot Brillat-Savarin a húsok szagmolekulájának tekintette. Ez tévesnek bizonyult, ugyanis a húsok illata számos molekula jelenlétéből ered. A korszerű szemlélet szerint az osmazom a hús különlegesen jóízű része, ami hideg vízben is oldódik; megkülönböztetendő a maradék résztől, ami csak forró vízben oldódik. Mint már a bevezetésben említettük, a molekuláris gasztronómia napjainkra önálló tudományterületté vált, és alkalmazásai, amit kulináris technológiának is nevezhetünk, úgy a mindennapi, otthoni, mint az éttermi kulináris tevékenységekben is jelentkeznek.

Az új tudományterület teljes irodalmának áttekintését ezen írás természetesen meg sem kísérelheti. Ezért a következőkben néhány kiragadott példán kívánjuk a területet érzékeltetni.

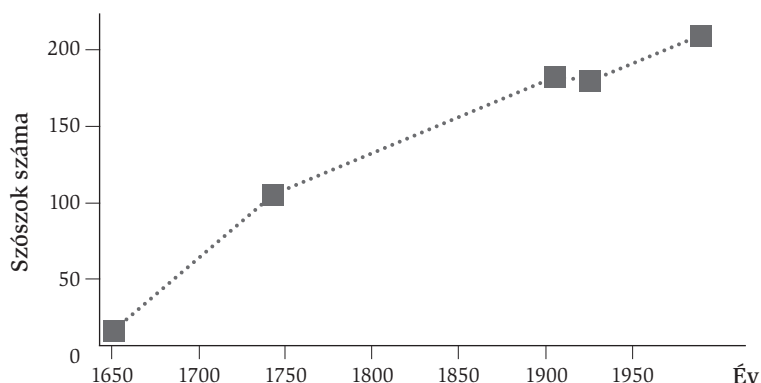
## A molekuláris gasztronómia tudományának születése

A molekuláris gasztronómia tudományának a felfedezése és megalkotása két kutató, a magyar eredetű Kürti Miklós Mór (Nicholas Kurti) oxfordi fizikusprofesszor és a párizsi Hervé This fizikokémikus találkozásának tulajdonítható.

Az alacsony hőmérsékletek fizikájával foglalkozó neves Kürti professzor zsenge ifjúságától kezdve a főzés hobbijának hódolt. 1969-ben Sir Benjamin Thompson, a későbbi Rumford gróf által 1799-ben alapított Királyi Intézet (Royal Institution) 170. ünnepi évfordulóján Kürtit kérték fel a Rumfordról szóló emlékbeszédre. Előadásának címe *„Fizikus a konyhában”* volt. Az előadáson hangzott el azóta elhíresült mondanéja: *„Azt gondolom, szomorú, hogy civilizációnk le tudja mérni a Vénusz légkörének hőmérsékletét, ám azzal nincs tisztában, hogy mi megy végbe a felfűjtban sütés közben.”* Az előadás alatt Kürti számos tudományos kísérletet végzett, többek között megmérte a hőmérsékletet egy felfűjt belsejében. Ugyanezen az előadáson Kürti bemutatta a kacsahús hipodermikus fecskendővel történő beinjekcióját friss ananászlével. Tette ezt azért, mert az ananászlében lévő bromelin nevű proteolitikus enzim a fehérjemolekulákat szétdarabolja, így puhítva a húst.

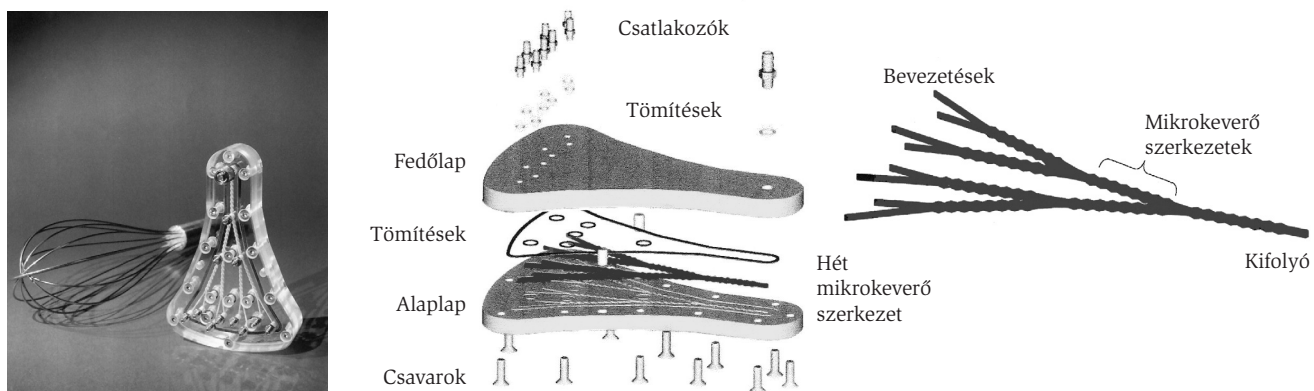
Kürti használta először a „Fizikai gasztronómia” kifejezést 1980 májusában egy Oxfordban rendezett konferencián. E konferencia folytatásaként rendezték meg később szintén Oxfordban az „Élelmiszer és szakácsművészet” (Food and Cookery) című szimpóziumot, amit 1985 júniusában a „Tudomány és babona a konyhában” konferencia követett.

Hervé This fizikokémikusként Párizsban a nagymamáktól (old wives<sup>2</sup>) származó receptkönyvek tudományos háttérének ki-derítésével foglalkozott 1980 óta, hogy tisztázza a főzési, sütési jelenségek mechanizmusát és elhatárolódjon a felesleges babonáktól és más hiteltelenségektől, külön hangsúlyt fektetve a régi bevált receptek, előírások pontosítására. Törekvései kiemelik ebben a molekuláris gasztronómia jelentőségét, amit ő új paradigmának tekint, és aminek, mint láttuk, feladata a kulináris szabályok leltározása és azoknak a pontosítása, amelyek kiállják a tudományos háttérű elemzést. A kulináris művészetnek, mint állítja, ez csak hasznára lehet, mert így létrejön a kulináris receptek esetében a bűzának az empirikus félremagyarázások, félreértések pelyvájától való elválasztása. Tudományos alapú receptgyűjteménye (adatbázisa) mára meghaladja a 25 000 darabot. Ezekből már több százat tudományosan pontosított. Az **1. ábra** mintát mutat be This adatbázisából.



1. ábra. A francia szók (mártások) számának növekedése a történelem folyamán [10]

<sup>2</sup> Ezt a kifejezést használja az angol irodalom.



2. ábra. A This által feltalált és a mainzi Institut für Mikrotechnikben Hessel és Werner által épített mikroreaktor keverőrésze sorosan és párhuzamosan köt össze vezetékeket a KDR-formalizmus által leírható emulziórendszerek (szószok) létrehozására. A nyolc bevezetés vezethet gázokat, folyadékokat és szilárd részecskéket [9, 10]

Kürti és This Párizsban találkoztak először 1986-ban, és ennek során merült fel bennük a gondolat, hogy együtt hozzanak létre és alapozzanak meg egy új „Molekuláris gasztronómia” elnevezésű tudományterületet. Annak érdekében, hogy az új tudományterületet ismertté tegyék és fejlesszék, 1988 márciusában javasolták Antonino Zichichi fizikusnak, az olaszországi Eri-cében lévő Ettore Majorana kutatóközpont igazgatójának workshop-sorozat megrendezését a kutatóközpontban. Így került sor 1992-ben fizikus és kémikus Nobel-díjasok és világhírű szakácsművészek (séfek) részvételével az első összejövetelre, amit aztán számos új követett. Kürti halála után, 1998-ban This lett ezek főrendezője és igazgatója, és a konferencia nevét „Nicholas Kurti Nemzetközi Molekuláris Gasztronómiai Konferenciá”-ra változtatta. A konferenciasorozatot This elnöklésével 1998 óta mind-máig két évente megrendezik.

## Kolloidok, illetve komplex diszperz rendszerek (KDR) [7,8]

Az ismertetést talán azzal kezdenénk, amit manapság nemcsak a háziasszony, hanem az utca embere is tud. Ez pedig az, hogy számos étel (fogás) diszperz rendszerekből áll. Ezeket formálisan kolloidnak nevezzük. Alapvetően a kolloidok egy adott fázis (gázbuborékok, olaj, vízcseppek vagy szilárd mikro-, esetleg nanoméretű részecskék) eloszlása (diszperziója) egy másik folyamatatos fázisban. Az emulziók, gélek, habok és szuszpenziók egyaránt alapvetően kolloidok, amiknek számos példájával találkozunk az étkezés világában. Például a tej olaj-a-vízben emulzió, a majonéz is komplex diszperz rendszer (KDR). A felvert tojáshabok száradáskor szilárd habbá keményednek. A dzsemek fizikai gélek. A legtöbb étel általában ennél azért bonyolultabb. Például a fagyaltban a gáz (levegő) diszpergálódik (habosítással) és jégkristályokat, fehérjeaggregátumokat, szacharózt és zsírokat (kristályos vagy folyékony cseppecskékként) tartalmaz kondenzált közegben.

A diszperz rendszerekre olyan, komplex diszperz rendszereket leíró formalizmus használható, amit 1791-ben Lavoisier vezetett be a kémiában, majd a kilencvenes években This alkalmazott a molekuláris gasztronómiában. A következő rövidítésekkel: G (gáz), O (olaj, esetleg oldott illatanyagokat tartalmazó folyékony zsír, például olívaolaj, de olvasztott libazsír, olvasztott kakaóvaj is stb.), W (víz, azaz bármilyen vizes oldat) és  $S_1, S_2, S_3, \dots$  (bármilyen szilárd anyag), és jelekkel (például diszpergálás valamiben: /, keverés valamivel: +, és így tovább) képletek írhatók le fizikai rendszerek jellemzésére. Például a krémek (mártások, szószok) felverésének jellemzésére a következő képlet írható:  $O/W+G \rightarrow (G+O)/W$ . Ugyanezzel a formalizmussal új fizikai rendszerek is leírhatók, például  $(G+O+S_1)S_2$  egy vizes oldatot tartalmazó géllel ír le, amiben levegőbuborékok, szilárd részecskék és olajcseppecskék diszpergálódnak [2]. Ennek a képletnek az alapján készítette el 2003-ban Pierre Gagnaire világhírű séf párizsi három Michelin-csillagos vendéglőjében a Faraday emlékének szentelt „Faraday-fésűkagylók” nevű ínycsengést [8,9]. A fázisokhoz szükséges mennyiség a képletekben alsó indexként írható. Például  $O_{95}/W_5$  egy olaj-a-vízben emulziót jelent, azaz 95 g olajat diszpergálva 5 g vízben. Így írva a konzerválás törvényei is eleget lehet tenni:  $O_{95} + W_5 \xrightarrow{E_w} O_{95}$  ahol  $E_w$  a képzéshez szükséges mechanikai energia.

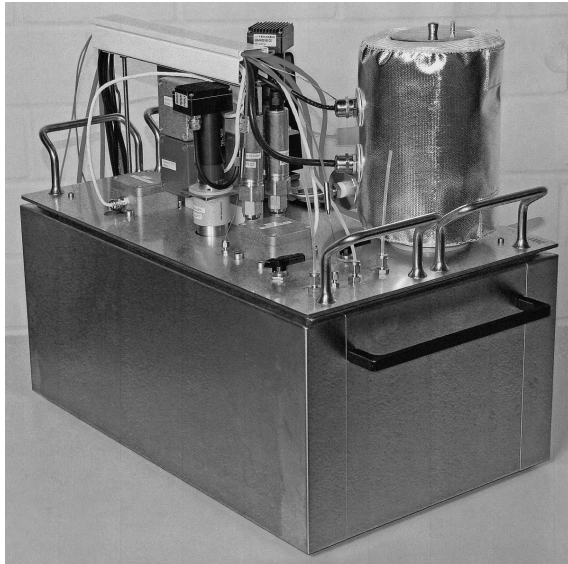
Mivel a szerkezetek méretei is lényegesek, ezeket zárójelben lehet szerepeltetni, például:  $O_{95} [10^{-6}-10^{-5}]/W_5$ , ahol a kitevők a diszpergált olajcseppek alsó és felső méretét jelentik (nemzetközi egységekben).

Természetesen a fentiek csak példák a formalizmusra, aminek számos további részletezését és pontosítását dolgozták ki.

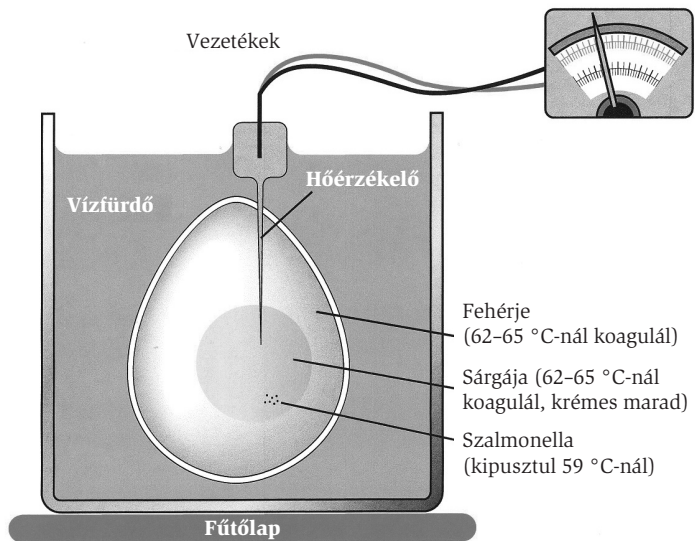
Gyakorlati alkalmazása ennek a formalizmusnak az, hogy hasonló képletek segítségével egyébként nehezen elképzelhető új, diszperz rendszerek (mártások, öntetek, szószok) is kreálhatók, és ezeket általánosítani lehet. Így például az  $O/W+G \rightarrow (G+O)/W$  képlet szerint olvadt csokoládéból felveréssel, vízben diszpergálva „Chantilly csokoládé”-nak nevezett ínycsengés (csokoládémousse, hab) születhet, belekevert tejszín vagy tojásfehérje nélkül. Vagy vízben diszpergált libamájából „foie gras Chantilly” (Chantilly libamájhab, mindkettő Pierre Gagnaire séf kreációja) készíthető.

This a müncheni Hessel mikromechanika-professzorral mikroreaktort készített emulzióalapú új szószok és mártások előállítására a KDR-formalizmus alapján (2. ábra) [10]. Ennek az automatizált változatát a 3. ábra mutatja. This véleménye szerint [8]

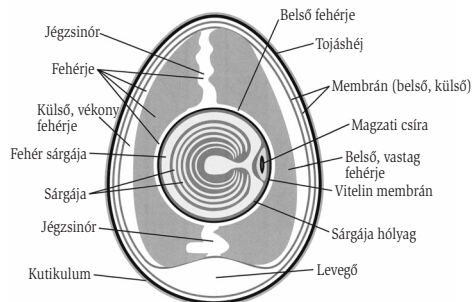




3. ábra. A mainzi Institut für Mikrotechnikben szószok kikeverésére továbbfejlesztett termosztátos készülék a mikroreaktor és a szivattyúk számítógépes működtetésére, ahol 100 bar nyomás és 60 l/h sebesség is elérhető [10]



4. ábra. Kürti Miklós (Nicolas Kurti) berendezése a tyúktójas belsejében lévő hőmérséklet mérésére [12]



5. ábra. A tyúktójas ultrahangos mérésekkel kiderített belső szerkezete [13]

6. ábra. Önműködő „szuvid” (sous-vide) termosztát



ez a készülék vezetékben áramló folyadékok, porok és gázok különböző arányú kombinálásával több millió új étel készítésére alkalmas [11].

## Utazás a lágy tojás körül

Mint annyi mindent, ezt az utatást is Kürti Miklós tette meg a kilencvenes évek elején úgy, hogy az e célra épített kis berendezéssel (4. ábra) megmérte egy tyúktójas belsejében a hőmérsékletet lágy tojás főzése közben [12]. Mérései alapján Kürti új receptet javasolt a lágy tojás főzésére. Úgy találta, hogy a világszerte 100 °C tojásfőzési víz hőmérséklet helyett 59–61 °C hőfokon körülbelül 60 percig főtt tojás állaga úgy a koagulált fehérje, mint a lágyn krémes jellegű sárgája miatt ideálisnak mondható.

A tyúktójas belsejében főzés közben lezajló fizikokémiai szol-gél folyamatokat később fényszóródással, sűrűségméréssel, elektroforézissel és analitikai mérésekkel pontosították. Ultrahangvizsgálatokkal ki lehetett deríteni a tyúktójas belső szerkezetét is [13] (5. ábra).

A tojásfehérje körülbelül 67 térfogatszázalékát teszi ki a tojásnak. Ez négy, egymás utáni vékony és vastag opálos rétegből áll.

A frissen tojt tojás pH-ja 7,6–7,9, és a tartalmazott CO<sub>2</sub>-től opálos színű. A tojás öregedése CO<sub>2</sub>-felszabadulással és a pH-emelkedéssel jár. A friss tojásfehérje 62 °C és 65 °C között koagulál.

A tojássárgája a tojásfolyadék 33%-ára tehető, tartalmazza a tojás teljes zsíradéktartalmát és körülbelül a teljes fehérjetartalom felét. Riboflavinon és niacinon kívül a tojássárgája vitamintartalma magasabb a fehérjénél (A-, D- és E-vitaminok). A sárgája több foszfort, mangánt, vasat, jódot, rezet és kalciumot tartalmaz, mint a fehérje. A tojássárgája pH-ja körülbelül 6,0, nem is igen változik, mert nem tartalmaz CO<sub>2</sub>-t. A már említett későbbi vizsgálatok Kürti tojásfőzési receptjét annyiban pontosították, hogy az ideális állaghoz 10 percnyi főzés is elegendő.

## Hőátadás sütéshez, főzéshez

Az ételek elkészítése során a molekuláris és szupramolekuláris jelenségek, reakciók létrehozása energiát igényel, ami többféle úton elérheti a rendszert. Ezek



közül a folyadékok, a gőzök, a levegő és a sugárzások hőátadása vehető igénybe. A számos lehetőség közül egyetlen olyannal szeretnénk csak foglalkozni, ami külföldön már igen, hazánkban még alig honosodott meg a háztartási ételkészítés szintjén. Jobb vendéglőkben már Magyarországon is kezdik alkalmazni. Ez a Franciaországban kifejlesztett „sous vide” eljárás.

## A „sous vide” sütési, főzési eljárás

A francia „sous vide” kifejezés fordítása vákuum alatt (vákuumban). Magyarországon vákuumsütésként vagy fonetikusan „szuvid”-sütésként ismerik, sőt a műveleti jelölésre a „szuvidolás” is használatos. Az Egyesült Államokban a „sous vide” helyett az eljárást „cryovack”-nek, illetve „cryovacking”-nek nevezik – ami egy berendezés márkanevéből származik. Olyan főzési, sütési eljárásról van szó, ahol a sütendő nyersanyagokat általában rövidebb-hosszabb időre vákuum alatt lezárt (lehegesztett) műanyag zacskóban, alacsony hőmérsékleten (általában 60 °C körül) termosztátált vízfürdőben melegítik néha 24 vagy még több órán át. Számos kiváló sült-húsféle készíthető azonban akár 30 perc alatt is. Tudvalevő, hogy az élelmiszerek zöme vizet tartalmaz. Míg a víz szobahőmérsékleten 100 °C-on forr, vákuumban csak 20 °C-on.

Az alacsony hőmérsékleten végzett hosszú (lassú) hússütés már a 19. század óta használatos volt, a jelenlegi vákuumos technikát Georges Pralus francia séf dolgozta ki a 70-es évek közepén, aki új eljárást keresett a zsíros libamáj és húsok sütésére. Ugyanis a hagyományos eljárás során a libamáj, de a húsok is 30–50%-os súlyvesztést szenvedhetnek. Pralus kimutatta, hogy a „szuvid” eljárás során a libamáj és a húsok zöme alig veszít súlyából, és a textúrája is javul. Az eljárást továbbfejlesztették, sőt nemcsak a konyhában, hanem ipari méretekben is használni kezdték. 1974-ben egy fagyasztott hússal foglalkozó konferencián, Strasbourghban bemutatták a „szuvid” eljárással sült, alig zsugorodott marhalapockát, ami nemcsak ízletes volt, hanem tárolási idejét is 60 napra hosszabbította. A „szuvid” sütés időtartamát három tényező határozza meg: 1. az alaphőmérséklet, amelyen az ételt (hús, hal) sütni kívánjuk, 2. a nyersanyag hőátadási jellemzői, 3. a feldolgozandó adag mennyisége. Például a húsok, amelyek nem igazán jó hővezetők és nem nyújtanak túl nagy elérhető felületet, hosszabb kezelési időt igényelnek. Ezen felül minél nagyobb a főzőfolyadék-étel arány a „szuvid” termosztátban, annál gyorsabban éri el az étel minden része a kiválasztott hőmérsékletet.

A „szuvid” technikának számos előnyt tulajdonítanak:

- az élelmiszer a műanyag zacskóban való vákuumozás előtt fűszerezhető és vajjal vagy olajjal kezelhető;
- alacsony, ellenőrzött hőmérsékletek megelőzhetik a túlsütést;
- mint említettük, kisebb a súly- és szaftvesztés;
- a feldolgozott ételeknek jobban megmarad a tápértékük.

A világon már számos helyen gyártanak jó minőségű „szuvid” berendezéseket. Ezek lényegében precíziós, önműködő termosztátokból, különböző méretű vízfürdőkből és fűtő-, illetve hőmérséklet-szabályzókból állnak. A teljesség igénye nélkül a **6. ábrán** bemutatunk egy „szuvid” berendezést. A termosztát mellett a „szuvid” technika vákuumozó berendezést is igényel, ilyen látható a **7. ábrán**. Ez ma már minden háztartási elektromos készülékeket forgalmazó cégnél Magyarországon is elfogadható áron beszerezhető.

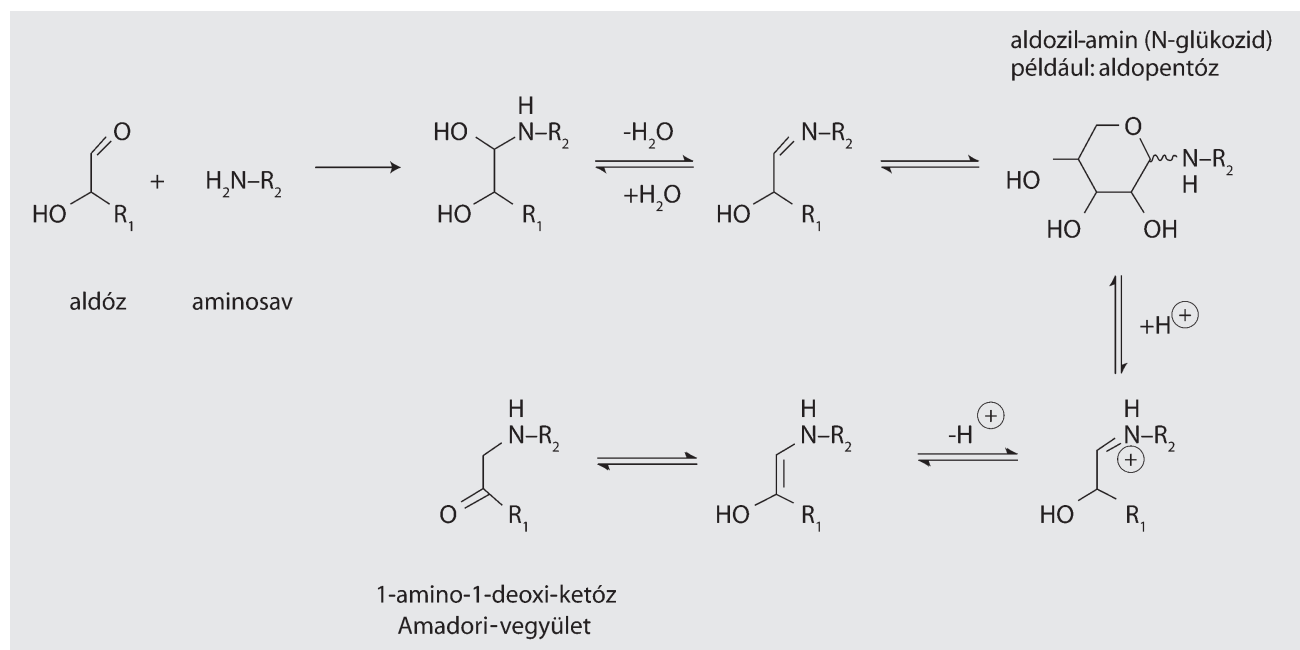
Sajnos, nem ugyanez a helyzet a „szuvid” termosztátok terén. Itt az árak még 150 000–500 000 Ft körül járnak. Idővel ezek ára biztosan csökkenni fog. Olyan ínyenceknek, akik már most ki szeretnék konyhájukban próbálni a „szuvid” technikát, e dolgozat szerzője egy, az Egyesült Államokban kidolgozott, olcsó berendezést alkalmazott. Ez a **8. ábrán** látható: egy közepes méretű műanyag hűtődobozból (5000–6000 Ft) és egy digitális hőmérőből (körülbelül 7500 Ft) áll. Ha a főzéshez, sütéshez kívánt hőmérsékletnél (60 °C) körülbelül 10 °C-kal magasabb hőmérsékletű vizet (~70 °C) a 10 literes hűtődobozba töltjük, aránylag kis hővesztés keletkezik, és a hőmérséklet 1–2 órán keresztül nagyjából állandó marad. Ennyi idő alatt szerény ínyenc igényeknek megfelelő sertés- vagy marha-steak készíthető.

**7. ábra.** Műanyag zacskóból levegő-kiszívással vákuumozó és a zacskót lehegesztő készülék



**8. ábra.** A szerző egyszerű „szuvid” berendezése





9. ábra. A Maillard-reakció kezdeti lépései

## A hőmérséklet hatása a húsokra

A húsiszom durván 75% vízből, 20% fehérjéből és 5% zsírból és más anyagokból áll. A húsok fehérjéje három csoportra osztható: miofibrilláris (50–55%), szarkoplazmás (30–34%) és összekötő (10–15%) szövetek. A miofibrilláris fehérjék (zömükben miozin és aktin) és az összekötő szövetfehérjék (főleg kollagén) összehúzódnak (zsugorodnak) melegítés hatására, míg a melegítés a szarkoplazmás fehérjéket tágítja. Ezeket a változásokat általában denaturálásnak nevezik. Melegítés közben az izomszálak keresztben és hosszban húzódnak össze, a szarkoplazmás fehérjék aggregálódnak és gélesednek, míg az összekötő szövetek összehúzódnak és feloldódnak. Az izomszálak 35–40 °C-nál kezdenek összehúzódnak. A szarkoplazmás fehérjék aggregálódása és gélesedése körülbelül 40 °C-nál kezdődik és körülbelül 60 °C-nál fejeződik be. Az összekötő szövetek összehúzódása 60 °C-nál kezdődik, de ez jelentősebben 65 °C felett következik be.

A hússzálak vízmegtartó kapacitását a miofibrillumok összehúzódása és duzzadása szabályozza. A víz körülbelül 30%-a a húsiszomban a miofibrillumok, a vastag (miozin) és vékony (aktin) szálak között rögződik. 40 és 60 °C között az izomszálak keresztben húzódnak össze, szélesítve a szálak közötti réseket. 60–65 °C felett hosszban kontraktálódnak, ezáltal jelentős vízvesztést okoznak. Ennek az összehúzódnak a mértéke fokozódik a hőmérséklet növekedésével.

Itt befejezésül meg kell említenünk, hogy egyrészt a „szuvid” sütés nem barnítja meg a húsokat, ezért egy rövid, magas hőmérsékletű sütésnek kell követnie annak érdekében, hogy a Maillard- és Strecker-reakciók alapján a sült húsok vonzó barna színe, illetve az íz- és illathatások kibontakozhassanak. Ez általában füstölő növényi olajat tartalmazó serpenyőben vagy konyhai lángszórával végezhető el. Ez utóbbi propán- vagy butángázzal működtetett változatai 1900 °C hőmérsékletre is képesek, és így rövid pörkölés után különösen szép és ízes barna pörköreget hoznak létre a húsok felületén. De ugyanezt megkapjuk alacsonyabb hőmérsékleten is (200–250 °C) füstölő növényi olajban való rövid barnítással.

## Illatok és ízek a Maillard- és Strecker-reakciók nyomán

Mint közismert, ízek és illatok az élelmiszerek termikus feldolgozásakor (sütés, főzés), kémiai reakciók során is képződnek. Ezek közül is kiemelkedő jelentőségűek a Maillard-, Strecker-, valamint karamellizálási reakciók. Ezek nemcsak a hússütés során kialakuló ízekért, hanem a csokoládé és kávé ízéért és illatáért, valamint az édességekben főtt, sült cukrok karamell-ízeiért, sőt még a frissen sült kenyérhéj illatáért és ízéért is felelősek.

Hangsúlyozandó, hogy a 9. ábrán bemutatott kezdeti Maillard-reakció kémiája határozza meg a fent említett ízek és illatok kialakulását. Ezek az úgynevezett „mesterséges” vagy „előidézett” ízek és illatok feltétlenül megkülönböztetendők a valóban természetesektől, illetve azoktól, amelyeket sokan „természetesnek” vélnek. Ezek feltétlenül külön kezelendők a valóban „természetesektől”, például a citrus-gyümölcsöktől. A molekuláris és szupramolekuláris gasztronómia egyik legjelentősebb feladatának tekinti a háziasszonyok, séfek és a nagyközönség előtt azoknak a finom különbségeknek a bemutatását és megértését, hogy hogyan keletkeznek az ízek és illatok, és hogyan lehet differenciálni a „természetes” és szintetikus ízek és illatok között.

Azokat a barna termékeket, amelyek aminosavak és cukrok vizes oldatának melegítésénél keletkeznek (9. ábra), Louis Maillard írta le először 1912-ben. A Maillard-reakciók részletes vizsgálatakat tárgyát képezték azóta is [14]. Ezek a reakciók bonyolult

tak és lefutásukat nehéz előre látni. Ennek ellenére ma már megértésük elfogadható szintre jutott úgy a reakciómechanizmusok, mint az ételek (például húsok) barnulása, ízének kialakítása esetében. További részletezésre itt sem térhetünk ki, de befejezésül még megjegyezzük, hogy a Maillard-reakciókban az aminosavak bármilyen fehérjéből keletkezhetnek és a cukrok is eredhetnek bármilyen szénhidrátból. A reakciók első lépéseként a fehérjék és szénhidrátok kisebb cukrokká és aminosavakká bomlanak. A következőkben a cukorgyűrűk kinyílnak és a keletkező aldehidek és savak az aminosavakkal reagálnak számos vegyület létrejöttével. Ezek az új molekulák azután egymás között reagálnak és létrehozzák a főbb íz- és illatvegyületeket. A Maillard-reakcióban a reduktonok és a hasadási termékek képződése az aminosavak lebontásával kapcsolatos. Ez a reakció magában foglalja az  $\alpha$ -aminosavak kondenzálását olyan Schiff-bázisból származó konjugált dikarbonil-vegyületekkel, amelyek aminosavszármazékokká degradálódnak, illetve egyszerűen dekarbonileződnek. Az egy atommal kevesebbet tartalmazó Schiff-bázis azután hidrolitikusan az eredeti aminosavnál egy atommal kevesebb szénrel rendelkező aldehidre hasad.

## Gyöngyösítés (szferifikálás) és molekuláris gasztronómiai kaviárképzés

Az általunk itt használt gyöngyösítés szó az angol „spherification”-ból ered. Ez a folyadékok különböző méretű, csepp formájú gyöngyökbe (membránba) való foglalását jelenti. A kaviárhoz hasonló látvány miatt ezek a mesterséges gyöngyök molekuláris gasztronómiai kaviárként váltak ismertté. Feltalálásuk és előállítási technológiájuk kidolgozása Ferran Adrià katalán séf és molekuláris gasztronómus nevéhez fűződik. Ezt a „kaviárfajtát” általában folyadékokból, gyümölcslevekből (például alma, körte, dinnye, szamóca stb.) vagy zöldséglevekből (például karotta, paradicsom, cékla, olíva stb.) állítják elő: a leveket cseppekké vagy gyöngyökké alakítják úgy, hogy a cseppeket külső gélburokkal vonják be. A bevonat vagy burrok gélesítési reakció eredményeként jön létre térhálósítás következtében.

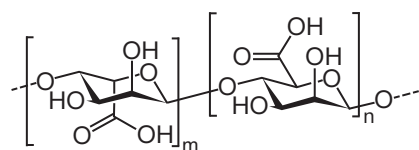
A nátrium-alginát alapanyaga anionos poliszacharid, az alginsav (**10. ábra**), amit tengeri algákból vonnak ki. A nátrium-alginát vízben jól oldódik, viszkózus (mézszerű) oldatot képezve.

A gélesítéses térhálósítás a nátrium-alginátban  $[(NaC_6H_7O_6)_n]$  jelen levő L-glukopiránuronsav és kalcium-klorid közötti reakció eredménye, ami a **11. ábrán** bemutatott szerkezetet hozza létre. A gyöngyösítés, illetve „kaviárképzés” során a gyöngyösítendő folyadékban (például szamócalében) 0,7–1,0 tömegszázalék (a koncentráció a folyadékféleségtől függ) nátrium-alginátot oldanak és azt tű nélküli orvosi fecskendőből vagy csepegtetőtölcsérből egy körülbelül 2,5 tömegszázalékos vizes kalcium-klorid-oldatba csepegtetik. A kalciumos oldattal való érintkezésnél az alginát térhálósódva gélesedik, a csepp köré vékony alginát-membrán képződik úgy, hogy a gyöngy-membrán belsejében marad az eredeti folyadék (például gyümölcslé). Ezeket a gyöngyöket leszárván és a gélesedést (a folyadékféleségtől függően) hideg vízben való öblítéssel leállítva az így előállított „kaviár” fogyasztható.

A **12. ábrán** látható Ferran Adrià séf „szamócakaviár”-ja, amely Spanyolországban, Németországban és a Benelux államokban már kiskereskedelmi forgalomban van, illetve a szerző által előállított „céklakaviárral” ízesített szendvics is.

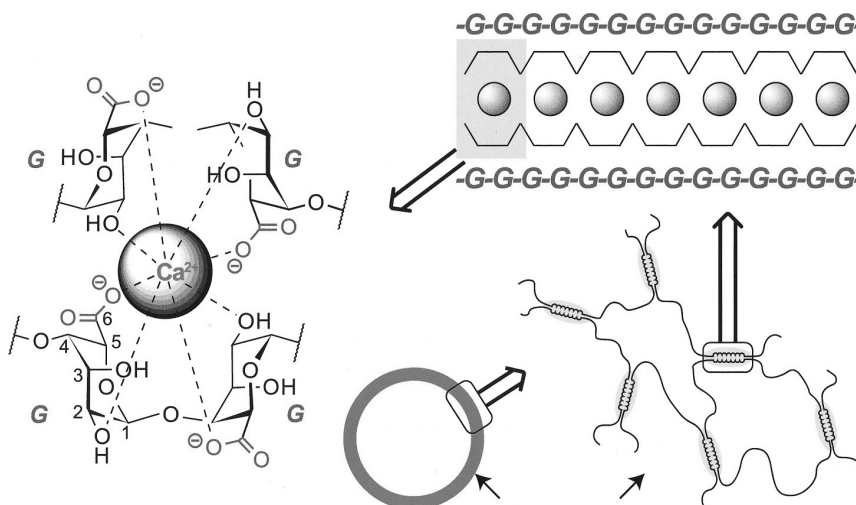
## Szupramolekuláris gasztronómia

Jelen szerző bizonyos fokú értetlenséggel vette tudomásul, hogy a molekuláris gasztronómia szakirodalmában a szakterület 1988. évi keletkezése óta egyáltalán nem tesz említést, illetve nem vesz tudomást az ételek készítése során lejátszódó szupramolekuláris vonatkozásokról. Érdekes módon a terület létrehozói és követői, bár számtalan említést tesznek a gasztronómiai műveletek



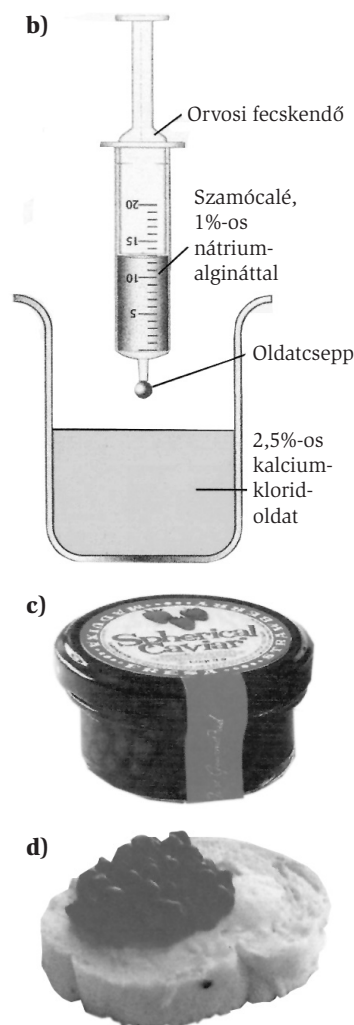
**10. ábra.** Az alginsav vázlatos szerkezete. Az egyszerűség kedvéért egy  $\alpha$ -L-gulopiránuronsav és  $\beta$ -D-mannopiránuronsav heteropolimert tartalmazó részletet mutatunk be

**11. ábra.**  $\alpha$ -L-Glukopiránuronsav (G) kalciumionokkal alkotott sójának vázlatos szerkezete a kalcium-alginát-membránnal körülvett gyöngyökben [18] kis átalakítással





**12. ábra. Molekuláris gasztronómiai gyöngyösítés (szferifikálás)**  
**a-b) Eszközök és oldatok a szamócakaviárhoz**  
**c-d) Ferran Adrià „szamóca-kaviár”-ja és libamájkrémes szendvics „céklakaviárral” (a szerző készítménye)**



bonyolult és sokféle mechanizmusáról, kizárólag a kovalens kötésű molekulákkal foglalkoznak. E sorok írójában felmerült a kérdés, hogy indokolt-e ez a negligálás akkor, amikor a legutóbbi körülbelül negyven év során fény derült arra, hogy számos molekuláris szerkezetet szupramolekuláris kölcsönhatások tartanak össze; ezek a kölcsönhatások az élet csaknem minden jelenségénél fellelhetők és a molekuláris mechanizmusok mellett tekintetbe és számításba veendő [16].

Itt ennek a kérdésnek az elmélyültebb diszkussziójára sem hely, sem lehetőség nincs, de befejezésül egy-két példát a fentiek alátámasztására azért megemlítenénk. E dolgozatban például előkerült az emulziók szerepe és jelentősége a gasztronómiában. Az ismert emulziók talán legismertebbje a majonéz. Ennek összetételében, stabilitásában a felületi feszültség, illetve a felületi anyagok, így például a lecitin szupramolekuláris kölcsönhatásokban való szerepe vitathatatlan. De ugyanúgy szupramolekuláris gasztronómiai kölcsönhatásokban szerepelhetnek a kollagének, a gélek, a globinok, az enzimek, a laktáz, a fehérjék, a peptidek, és a gasztronómiai sütés-főzés során keletkező szupramolekuláris kölcsönhatásokra még számos példa említhető [16].

Gondolván, hogy érdekes kérdések felmerülése esetén talán a legcélszerűbb a lehető legilletékesebb véleményét megkérni, 2010. szeptember 29-én levélben fordultam Jean-Marie Lehn francia kémiai Nobel-díjas professzorhoz nézetét kérve a kérdéstről. Az egyszerűség kedvéért angol nyelven idézzük Lehn professzor szeptember 30-i levelének a témára vonatkozó részletét: „the mechanism ... is both molecular and supramolecular, as you need both the molecule and its interactions with the receptors” [17].

## Utószó

Napjainkra a magyar-angol Kürti Miklós és a francia Hervé This eredeti és 1988-ban molekuláris gasztronómiaként megalapozott elképzelései széles körben elterjedtek és elfogadottakká váltak. A molekuláris gasztronómia és remélhetőleg lassanként a molekuláris és szupramolekuláris gasztronómia jelentős továbbfejlődésnek néz elébe a kulináris jelenségek jobb megértése és alkalmazásaik terén egyaránt.

## IRODALOM

- [1] J. A. Brillat-Savarin, La physiologie du gout, Paris, 1825. Magyar kiadás: J. A. Brillat-savarin: Az ízlés fiziológiája, ford. Ambrus Zoltán és Ambrus Gizella, Singer és Wolfner, Budapest, 1912. (Szerző szerint a francia „gout” szónak a téma kontextusában a helyes fordítása „ízlelés”.)
- [2] H. This, Molecular Gastronomy, Exploring the Science of Flavor., Columbia University Press, New York, 2006.
- [3] a. R. L. Wolke, What Einstein Told his Cook, Kitchen Science Explained, W. W. Norton & Co., New York, 2002. Magyar kiadás: R. L. Wolke: A tudós szakács. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2010.
- [4] P. Barham, The Science of Cooking, Springer, Berlin, 2000.
- [5] P. Barham, L. H. Skibtd, W. L. Bredie, M. B. Forst, P. Möller, J. Risbo, P. Snitjaer, L. Mörch Mortensen, Molecular Gastronomy: A New Emerging Scientific Discipline, Chem. Rev. (2010) 110, 2313–2365.
- [6] H. This, Food for tomorrow? How the scientific discipline of molecular gastronomy could change the way we eat, EMBO Reports (2006) 7, 1062.
- [7] H. This, Formal Description and Formulation, Int. J. Pharmaceutics (2007) 344, 4.
- [8] H. This, Molecular Gastronomy, a Scientific Look at Cooking, Acc. Chem. Res. (2009) 42, 575.
- [9] H. This, <http://www.pierre-gagnaire.com> (science and cooking section). Letöltve: 2010.10. 27.
- [10] H. This, V. Hessel, B. Werner, levélbeni személyes közlés, 2010.
- [11] T. This, Building a Meal, From Molecular Gastronomy to Culinary Constructivism, Columbia University Press, New York, 2009.
- [12] N. Kurti, H. This-Benchard, Chemistry and Physics in the Kitchen, Scientific American, (1994) April, 44.
- [13] K. J. Opielinski, Ultrasonic Parameters of Hen's Egg, Molec. Quant. Acoust. (2007) 28, 203.
- [14] H. E. Nursten, The Maillard Reaction. Chemistry, Biochemistry and Implications, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2005.
- [15] F. Adrià, <http://www.eatmedaily.com/2009/01/spherical-caviar-in-a-jar-molecular-gastronomy/>. Letöltve: 2010. 10. 27.
- [16] J. L. Atwood, J. W. Steed, Encyclopedia of Supramolecular Chemistry, Marcel Dekker, Inc., New York, vol. 1, 2, 2004.
- [17] J. M. Lehn, levélbeni személyes közlés, 2010. szeptember 30.
- [18] Bokros Attila, Pádár Petra, Szolomájer János, Kupihár Zoltán, Kele Zoltán, Kovács Lajos, Kémiai bemutató kísérletek, I. rész, A kémia tanítása (2010) 18(2), 3.



# Gasztronómiai íz-, illat- és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei

## Előszó

A dolgozat nem élelmiszerkémiai, hanem gasztronómiai szempontból kívánja témáját ismertetni, miután előző munkánkban már definiáltuk a gasztronómiát, az ételek és italok szakértő ismeretét, illetve élvezésük művészetét [1]. Ott arra is kitértünk, hogy a múlt évszázad közepén magyar kutatói segédlettel (Kürti Miklós, Oxford) létrehozott molekuláris gasztronómia azt kívánja megismerni és hasznosítani, hogyan működik a főzés és sütés a molekulák és szupramolekulák szintjén, illetve mi történik a molekulákkal, amikor hőhatás éri őket.

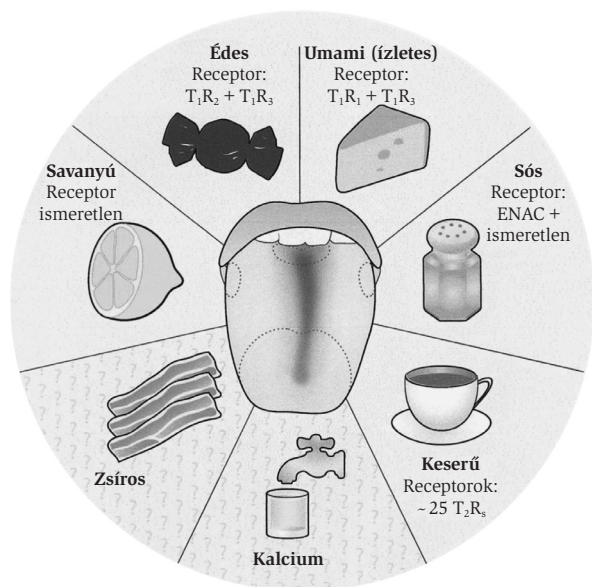
A mostani írás a fentieket kiegészítve azokkal az ismeretekkel foglalkozik, hogy mi történik, amikor az ízeket keverik, valamint azt is elemezzük, hogy a gasztróélvező hogyan értelmezi az ízeket, illatokat és zamatokat, és mindez milyen kihívásokat jelent azokkal a tradicionális érzékelésekkel és szokásokkal szemben, amelyektől egy étel ízletesnek és élvezetesnek tűnik. Ehhez alapvető premisszánk, hogy az elemzéshez az új kémiai, fizikai elemzési és adatbányászati eljárások, illetve azok alkalmazásai számos lehetőséget nyújtanak gasztronómiailag új íz-, illat- és zamatkombinációk létrehozására és vizsgálatára, s ezek nemcsak kiterjeszthetők, sőt forradalmasíthatják étkezési ízlésünket és szokásainkat, hanem képesek átértelmezni az ételek élvezetét is. Bizonyos ételeket együtt fogyasztva ízletesnek érzünk, másokat nem. Ennek az egyszerű megfigyelésnek az eredete az emberi érzékek biokémiájában rejlik.

## Bevezetés

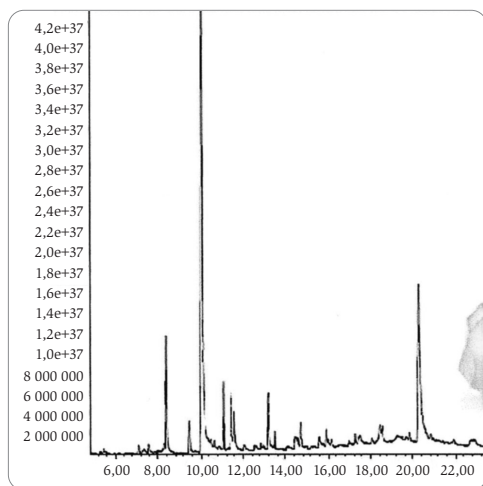
Egy étel minőségéről, ízletességéről, illetve élvezeti fokáról születő döntés messzemenően személyes jellegű. Mint tudjuk, ételünkkel az érzékelésen keresztül kerülünk kapcsolatba, azaz tapintás, látás, hallás, ízlelés és szaglás útján. Talán furcsának tűnik, de például a tapintási és látási érzékelések messzemenően befolyásolják az ételek ízével kapcsolatos észleléseinket. Másrészt érezzük az étel ízét, ha jó minőségű porcelántányérból vagy ezüst-, illetve papírtányérból eszünk, azaz az ízérzékelés a felhasznált edény minőségétől is függ. Hasonlóan, az étel színe is befolyásolhatja ízlelésünket; gondoljunk arra, hogy milyennek éreznénk egy kékre festett libacombot...

Az étel élvezésében kémiai érzékeléseink a legjelentősebbek. Ezek az íz, ízlelés, az illat (szag) és a *chemesthesis* [2] (e szónak nincs magyar nyelvű szótári megfelelője, talán „kemesztézis”-re lehetne magyarítani). Ez utóbbit a bőr és a nyálkahártyák kémiai érzékenységeként definiálják, és akkor jelentkezik, amikor a vegyületek aktiválják a más érzékeinkhez, például fájdalomhoz, tapintáshoz és étetéshez kötődő receptorokat. Ezek a kémiai indukált érzésreakciók nem illeszkednek a hagyományos ízlelési és szagérzékelési kategóriákhoz. A kemesztetikus érzékelésre példa a paprikától, illetve hatóanyagától, a kapszaicintól származó égető, csípős érzés, vagy a mentol okozta hűsítő érzet. Előbbieket a gasztronómiában csípősségnek vagy pikánságnak is nevezzük.

Az ízlelés vagy kóstolás a szájban levő szenzorokkal érzékeli a folyadékokban oldott kémiai vegyületeket. Az illat és a szaglás a levegőben lévő vegyületeket detektálja, de érzékeli azokat az illatokat is, amelyeket az élelmiszerek a szájüregünkben emitálnak. Ízlelésünk az édes, savanyú, sós és keserű ízek érzékelésére alkalmas. Újabban ezekhez további ízek csatlakoztak, mint az umami, a zsíros és a kalcium (**1. ábra**). Az 1905-ben Japánban felfedezett furcsa, gyámoltalan elnevezésű umami japánul kellemesen felséges ízt jelent, és valószínűleg létezését csak 2000-ben sikerült a megfelelő receptorokkal igazolni [5]: az umami tulajdonképpen egy aminosav, illetve a nátrium-L-glutamát íze, aminek egyik fő jellegzetessége, hogy más ízmolekulákkal társulva fokozza azok intenzitását és az ízlelőbimbókra gyakorolt hatását. Ugyanakkor közismert, hogy több ezer ízt és illatot felismerünk és érzékelünk. A nyelvünkön, a szájpadlásunkon és a felső torkunkon lévő kemoreceptorok felismerik a megfelelő ízjelzéseket, például a keserűt, a savanyút, az édeset. Ezen észlelések mindegyike annak érdekében fejlődött ki, hogy információt közöljön a különösen kíváncsi (például só, cukor, aminosavak), vagy nemkíváncsi (toxikus alkaloidák) élelmiszerekről. A receptorok a nyelven lévő ízlelőbimbókban helyezkednek el. Az ízlelendő molekulák az ízlelőbimbók csúcsán lévő pórusokon keresztül jutnak a bimbókba, és adszorbeálódnak az ízreceptor sejteken. Az édes ízt érzékelő receptorfehérjéket például aránylag csak a közműltban azonosították. [3,4] Mindezek a receptorok a G-fehérjéhez csatolt receptorok szupercsalád alosztályát képezik, amelyeket  $T_1R_1$ ;  $T_1R_2$ ;  $T_1R_3$  és  $T_2R$ -ként azonosítottak. Például a  $T_1R_2$ – $T_1R_3$  heterodimerek az érzékelői az édességnek, míg a  $T_2R$ -ek a keserű ízt érzékelik. A savanyú és sós ízek érzékelői lényegében ioncsatornák.



1. ábra. Ismert és javasolt ízek [6]



2. ábra. Nyers uborka ízanyagainak gázkromatogramja [7]

Az eltelt évszázadok során az ételek előállítását empirikusan kialakított receptekben rögzítették, és az ízek, zamatok minőségét, élvezeti értékét [6] az egyéni, személyes ízlés határozta meg. Azt, hogy a különböző élelmiszer-alapanyagok közül mit, mivel, hogyan és milyen arányban kell vagy lehet párosítani, keverni, mint említettük, az empiria jellemezte, és az élvezhetőséget a kellemesség, illetve elfogadhatóság műveletileg közelebb hozta a művészethez, mint a tudományhoz (szakácsművészet).

A molekuláris és szupramolekuláris [1] gasztronómia bevezetésével manapság egzaktabb gasztronómiai ismeretekkel rendelkezünk a főzés és sütés alatt végbemenő fizikai és kémiai jelenségekről, de az ízek párosításával, keverésével, illetve molekuláris hátterével és az ezek során kialakuló ízhatások vizsgálatával még csak mostanában kezdett az élvezeti gasztronómiai [6] kutatás foglalkozni. Ennek az útnak az elejéről számolunk be a továbbiakban.

## Ízmolekula-hasonlóság

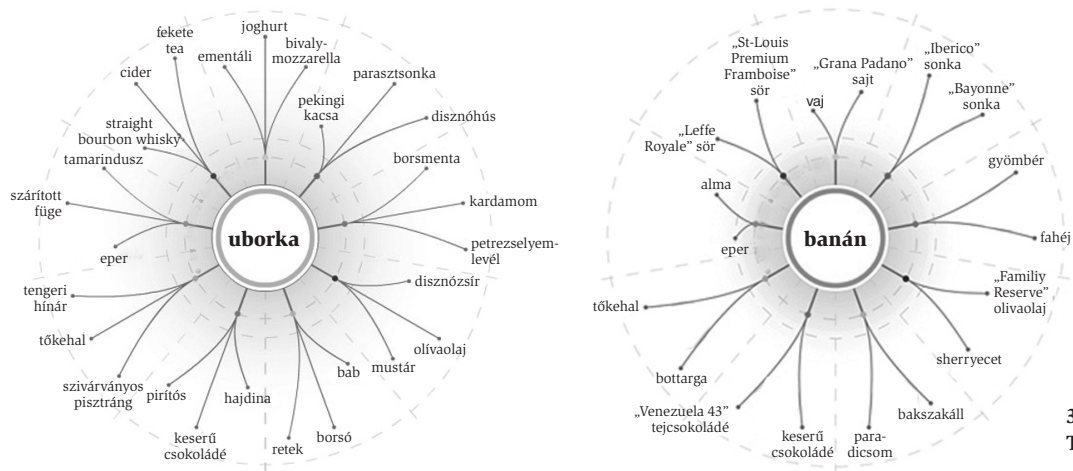
Az ízmolekula-hasonlósági elvet *Heston Blumenthal* angol séf és molekuláris gasztronómus vetette fel először 2002-ben, majd részletezte számos példával „fűszerezve” 2008-ban [7,8]. Blumenthal a séfje és tulajdonosa a berkshire-i Fat Duck nevű három Michelin-csillagos vendéglőnek, és nem kutató ugyan, de vendéglője mellett nagyon jól felszerelt műszeres fizikai kémiai laboratóriumot is működtet. Az általa alkalmazott elv szerint, ha két étel azonos illékony molekulákat tartalmaz, akkor keverékük étkezéskor kellemes íz- és illatérzetet kelt. Az élelmiszer-alapanyagok elemzésére folyadékkromatográfiát és tömeg-spektrometriás gázkromatográfiát alkalmazva számos élelmiszer-alapanyagot vizsgált. Például a **2. ábra** a nyers uborka illó ízanyagainak a gázkromatogramját mutatja be. Fentiek alapján Blumenthal vendéglője számos új, nem konvencionális, ízletes ételkombinációt kínál, például jázminos sertésmáját vagy kaviáros fehércsokoládét [8]. Blumenthal felkérte *François Benzi*t, a világ második legnagyobb illat-, ízgártó és -forgalmazó, Svájcban székelő Firmenich S. A. [9–11] nevű cégének fővegyészét, hogy működjenek együtt az ízhasonlóság vizsgálatában. Blumenthalék elképzelései gyorsan elterjedtek a világban, és számos séf egyedül vagy illatkémikusok együttműködésével rengeteg új, ízletes ételkombinációt hozott létre. Így például *Martin Lerch* norvég kémikus, aki fémorganikus vegyületekkel foglalkozik, Blumenthalék nyomait követve megalapította az interneten a Khymos nevű [12] blogot és a „They Go Really Well Together (TGRWT)” (Valóban kitűnően illenek egymáshoz) sorozatot, amelyben főleg saját tapasztalatait ismerteti az ízek hasonlósági elve alapján kialakított ízletes ételekről. Ezek egyike például a földieper korianderrel: ezt az ízeiről szóló kézikönyv [13] nyomán kiválasztott (7)-3-hexanal ízvegyület alapján alkotta, amely mindkettőben jelen van.

Blumenthal, bevallása szerint, az ízek hasonlóságát alapul vevő ételeinek kidolgozásakor erősen támaszkodik az eredetileg 1963-ban létrehozott „Volatile Compounds in Food” [14] című nyomtatott adatbázisra. Ez az adatbázis az International Organization of the Flavour Industry szervezet révén 2000-től az Interneten is hozzáférhető [14].

## Számítógépes ízpárosítás (élelmiszer-párosítás)

Szintén a Blumenthal által bevezetett ízhasonlósági elv ihletése nyomán a már említett *François Benzi* vegyész és *Bernard Lahousse* biomérnök Belgiumban magánvállalkozásként megalapította a Sense for Taste (Ízérzet) nevű céget azzal a céllal, hogy főleg séfeknek és élelmiszer-vállalatoknak, de magánszemélyeknek is innovatív ízpárosításokat forgalmazzanak. A cég *Foodpairing* című weblapja elsősorban folyadékkromatográfiával és tömegspektrometriás gázkromatográfiával, de más műszeres analitikai el-

*Gasztronómiai íz-, illat- és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei*



**3. ábra.** A Sense for Taste cég ízpárosítási „fái” [14]

járásokkal is az élelmiszerek ízeit elemzi, és saját algoritmusokkal szoftvereket fejleszt és forgalmaz kompatibilis ízpárosítások létrehozására. Ezek a cég weblapján hozzáférhetők [15]. A **3. ábra** a párosítások vizualizálására alkalmas „fákat” mutat be. A továbbiakban szó szerint, prospektusszerűen ismertetjük az interaktív weblap alkalmazási lehetőségeit [16].

„Az eredeti *Foodpairing* weblap körülbelül 250 különböző alapanyag párosításait tette hozzáférhetővé (a 3. ábrán látható) statikus ábrák formájában. Magát a megvalósítást – azaz hogy miből mennyit és milyen formában használunk fel ahhoz, hogy valóban működjön a párosítás – az olvasóra hagyták, bár az egyes kategóriákat – például gyümölcsök, húsok vagy halak – külön ágakként tüntették fel.

2011-től megújult kezelőfelülettel megjelent a *Foodpairing* profi változata, amit eleinte csak a gasztronómia területén dolgozók számára kínáltak. Emellett tovább működött az ingyenes, mindenki számára elérhető statikus oldal. 2012-ben viszont megszűnt az ingyenes oldal, és ezzel együtt átalakult a *Foodpairing* üzleti modellje is. Ma már bárki regisztrálhat a *Foodpairing* oldalán, és ingyen böngészhet 100 alapanyag között. Aki a teljes, folyamatosan bővülő és jelenleg 870 alapanyagból álló adatbázishoz szeretne hozzáférni, havi 15 euróért (azaz egy szakácskönyv áráért) vagy évi 129 euróért (azaz egy-két többcsillagos séf könyvének áráért) válthat ki profi hozzáférést. Tehát több szinten is ki lehet próbálni és meg lehet ismerni az új kezelőfelületet és az alapanyagok közötti párosításokat.

Az alapanyagok közötti böngészés megkezdésekor először talán a modernebb megjelenés tűnik fel. Az egyes alapanyagok ábrái felépítésüket tekintve hasonlítanak statikus elődjeikre, de kissé rendezettebbek és áttekinthetőbbek is lettek. A megtekintett alapanyag „párosításgráfja” (3. ábra) közepén továbbra is magát az alapanyagot találjuk. Körben a különböző kategóriák ikonjai előtt három példát látunk, amennyiben létezik egyáltalán párosítás az adott kategóriából. Ha zavaróak a kategóriák ikonjai, akkor a jobb alsó sarokban található pöttyre kattintva eltüntethetjük őket. További kategóriánkénti párosítási javaslatért a központi alapanyag közelében található csomópontra kattintva nagyíthatunk bele az egyes ágakba. Itt további alkategóriákat is találunk, például zöldségeknél magukat a zöldségeket és a gombákat, vagy halaknál a kagylókat, a tengeri és édesvízi halakat, valamint egyéb tengeri élőlényeket (például algák, kaviár). Az eredeti ábrához a középső főalapanyagunkra kattintva juthatunk vissza.

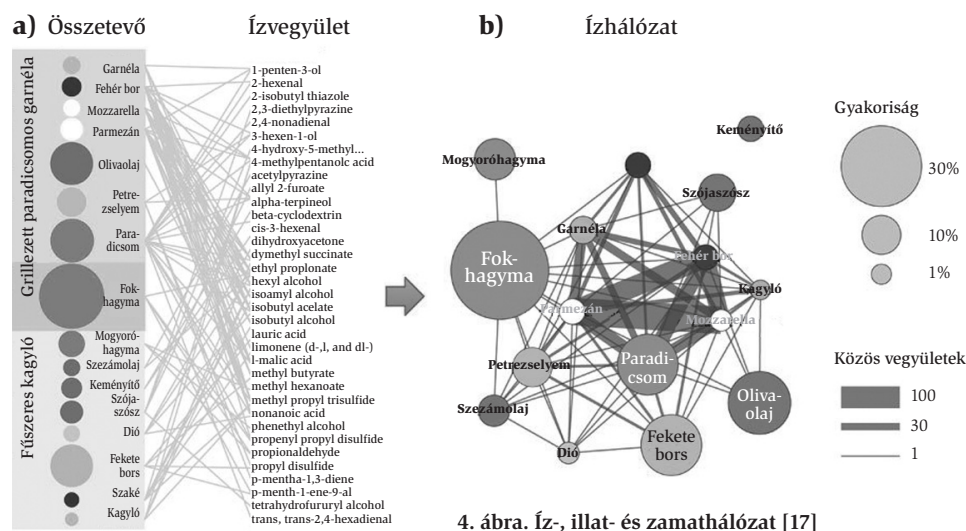
Az egyes alapanyagokra kattintva rövid leírást olvashatunk az adott alapanyagról, gyakran képpel is ellátva. Ezen túl két lehetőség közül is választhatunk, mégpedig átvándorolhatunk a kiválasztott alapanyag párosításgráfiához, és ott folytathatjuk a böngészést, vagy hozzáadhatjuk az alapanyagot a párosításlistánkhoz. Az eddig összegyűjtött párosításainkat a jobb oldalon tekinthetjük meg, törölhetünk belőlük alapanyagokat és megnézhetjük a gráfjaikat is. A kiválasztott alapanyagok a bal oldali ábrákban is kiemelve, nagyobb betűvel jelennek meg az adott kategóriájukban.

Arról, hogy melyik alapanyag mennyire jól párosítható a kiválasztott alapanyaggal, egyrészt magából a párosításgráfból értesülhetünk. A középső alapanyag körül koncentrikus körök találhatók, melyeknél a közelebbi körön belül elhelyezkedő alapanyagok jobban harmonizálnak az adott alapanyaggal. Másrészt a jobb oldali lila nagyítóra kattintva nyithatjuk meg a keresőt, s itt ötös skála alapján sorrendbe gyűjtött listaként tekinthetjük meg a párosítható alapanyagokat.

Ebben a keresőben számos új és igazán segítőkész funkciót is találunk. Üres jobb oldali párosításlista esetén mind a 870 alapanyag között kereshetünk. Amint viszont kiválasztottunk egy vagy néhány alapanyagot a párosításlistánkba, életbe lép a „scope”, azaz látókör funkció. A bal oldali ikon a párosításlistában szereplő alapanyagaink saját párosításkapcsolatainak egyesített listáját mutatja, míg a másik ikon a metszetét. Tovább segíti az áttekinthetőséget a kategóriák leszűkítése, például ha csak ecetet keresünk a jelenlegi párosításlistánkhoz. *(Végül az összeállított kombinációinkat elmenthetjük, és akár receptet is begépelhetünk hozzá!)*

Rengeteg bővítésen és igen jól sikerült újításon ment keresztül a *Foodpairing* weboldala. Aktuális formájában kitűnően használható új ételek, receptek tervezése, vagy akár meglévő receptek megújítása során is” [16].

A fentiekben ismertetett algoritmusok és szoftver részleteit Lahousse nem volt hajlandó közzétenni, annyit azonban elárult, hogy azok több mint két illékony vegyületet vesznek tekintetbe egy vizsgált élelmiszerpár esetében, és hozzátette, hogy szerinte az ember különböző vegyületeket különböző küszöbértékeknél érzékel, így erre is figyelni kell.



## Íz-, illat-, zamathálózatok

Ugyancsak a Blumenthal- és Benzi-Lahousse-féle alapokból indulva, de felvetve, hogy ezek nem tudnak kielégítő magyarázatot adni minden gasztronómiai ízkombinációra, az angol *Sebastian Ahnert* cambridge-i elméleti fizikus és műkedvelő molekuláris gasztronómus által vezetett csoport (amelynek *Barabási Albert-László* román-magyar-amerikai fizikus is tagja volt) kidolgozott egy ízhálózatot [17]. Ebben több mint 50 000 online konyharecept hozzávalóját és íz-, illetve illat- és zamatvegyületeit (amihez forrásként egy kézikönyv szolgált [19]) rendelte egymáshoz. Ezeket észak-amerikai, latin-amerikai és ázsiai jellegük szerint csoportosították annak köszönhetően, hogy a gasztronómusok lehetővé tették a gasztronómiai összetevők körülbelül 51 íz-, illat- és zamatvegyületének azonosítását.

Az eredményeket páros gráfba tömörítették. Az egyik oldal 381, az egész világon használt recept összetevőit, a másik az említett összetevők 1021 íz-, illat- és zamatvegyületét tartalmazza (**4.a ábra**). Ennek a gráfnak a vetülete az az íz-, illat- és zamathálózat, amelyben két csomópont (összetevő) akkor kapcsolódik, ha legalább egy íz-, illat- és zamatösszetevőjük közös (**4.b ábra**). Az egyes kapcsolatok, vonalak súlya a közös íz-, illat- és zamatvegyületek számából adódik, így az íz-, illat-, zamathálózat súlyozott hálózat.

Mivel bizonyos íz-, illat- és zamatvegyület nagyszámú összetevőben is szerepel, a létrejövő íz-, illat- és zamathálózat közvetlen vizualizálásához a hálózat túlságosan sűrű. Ezért egy eljárással minden összetevőnek meghatározták a statisztikailag szignifikáns kapcsolatait. Nem meglepő, hogy a hálózat mindegyik modulja egy ételosztálynak felel meg. A modulok közötti kapcsolatok tájékoztatnak azokról az ízekről, illatokról és zamatokról, amelyek összetartják a különböző élelmiszer-csoportokat. Így például a gyümölcsök és tejtermékek közel vannak az alkoholos italokhoz, de a gombok elkülönülnek, mivel nagyszámú íz-, illat- és zamatvegyületük csak más gombákkal közös.

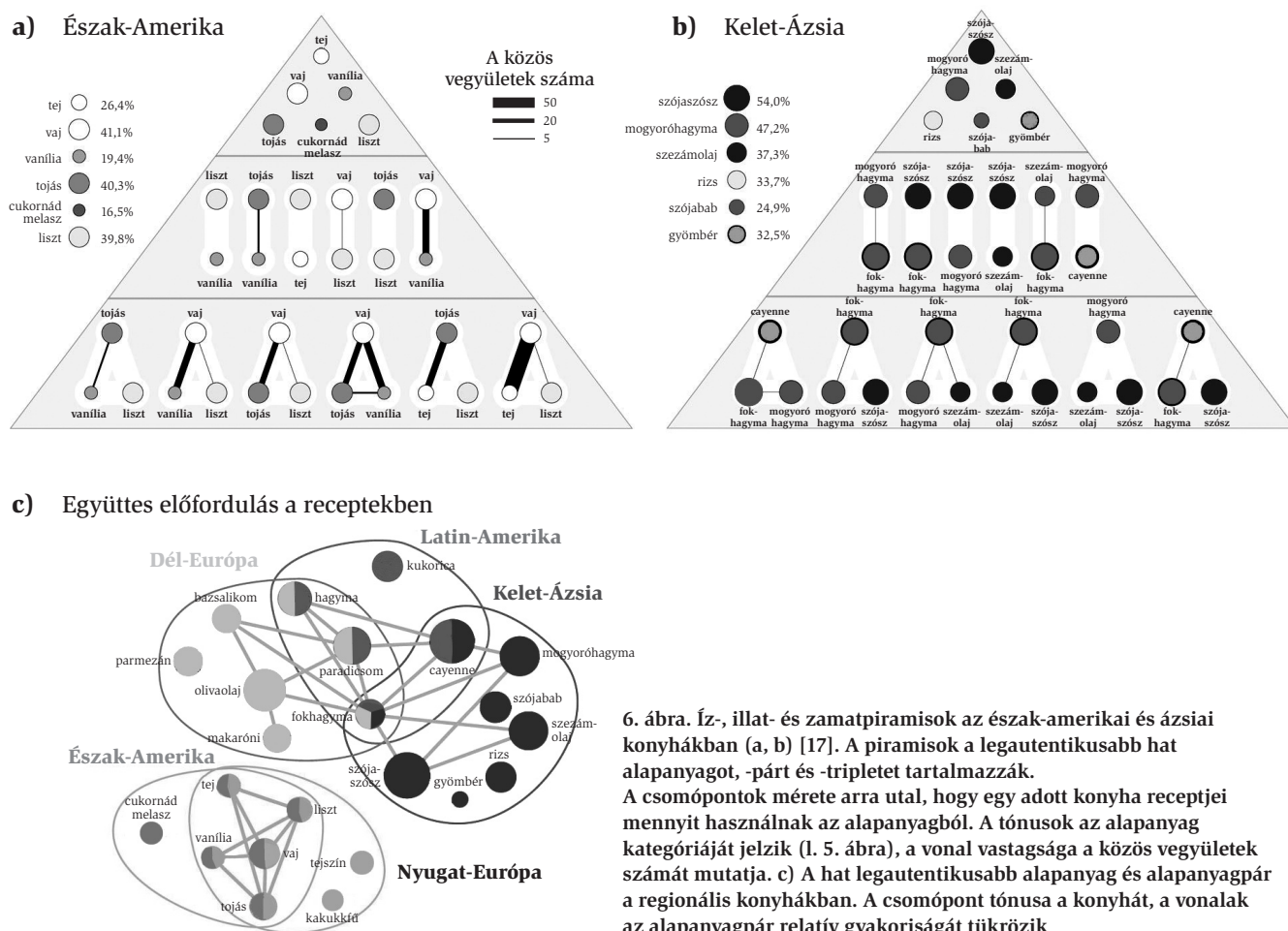
Az íz-, illat- és zamathálózat lehetővé tette, hogy a szerzők az ételpárosítás-hipotézist topológiai kérdésként fogalmazzák újra: tehát gyakrabban használunk-e olyan alapanyag-párosításokat, amelyek erősen kapcsolódnak az íz-, illat-, zamathálózatban, vagy igyekszünk ezeket elkerülni? Ennek a hipotézisnek az ellenőrzésére a szerzőknek szükségük volt olyan, az emberek által kedvelt alapanyag-kombinációkra, amelyek hozzáférhetők kurrens ételreceptekben. A szerzők két amerikai receptgyűjtemény (*epicurious.com* és *allrecipes.com*) 46 498 receptjét használták fel a munkához. A világkonyha kimondottan nyugati értelmezését elkerülendő, egy koreai (*menupan.com*) adatbázist is igénybe vettek. A recepteket földrajzilag megkülönböztethető (észak-amerikai, nyugat-európai, dél-európai, latin-amerikai és kelet-ázsiai) konyháként csoportosították.

Az alapanyagok száma egy átlagos receptben nyolcnak bizonyult, eloszlásuk kötött, ami jelzi, hogy ritkák azok a receptek, amelyek nagyon sok vagy nagyon kevés alapanyagból készülnek. Ezzel szemben a különböző specifikus alapanyagok népszerűsége négy nagyságrendben változik, ezáltal igazolva azt, hogy milyen nagy különbségek vannak a receptekben használt alapanyagok összetevői között. Ez még meggyőzőbben látható a **5. ábrán**.

Konkrétumokat is felsorolva, egy észak-amerikai ételben, például a garnélarákos-paradicsomos rostonsültben egyaránt van 1-penten-3-ol, és a recept szerinti mozzarella, parmezán és paradicsom tartalmaz 4-metilpentánsavat. Ez a nyugat-európai receptekben szintén előfordulhat. Ellenben a kelet-ázsiai és a dél-európai receptekben ellenkező a trend, az alapanyagok valószínűleg nem osztoznak az íz-, illat- és zamatösszetevőkben. Egy másik példa: az észak-amerikai receptek gyakori összetevői, a tej, vaj, kakaó, vanília, tejszín és tojás közös íz-, illat-, zamatvegyületeket tartalmaznak sok más élelmiszerrel. Amikor ezeket az alapanyagokat kiiktatták a vizsgálatokból, a közös ízek, illatok és zamatok érzete is gyengült. Ezzel szemben amikor az ázsiai konyhánál kiiktatták az olyan alapanyagokat, mint például a marhahús, gyömbér, sertéshús, cayenne bors, csirkehús, hagyma, amelyek a legkevesebb közös íz-, illat- és zamatvegyületet tartalmazták, az íz-, illat-, zamatösszetevők száma megnőtt.



*Gasztronómiai íz-, illat- és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei*



6. ábra. Íz-, illat- és zamatpiramisok az észak-amerikai és ázsiai konyhákban (a, b) [17]. A piramisok a legautentikusabb hat alapanyagot, -párt és -tripletet tartalmazzák. A csomópontok mérete arra utal, hogy egy adott konyha receptjei mennyit használnak az alapanyagból. A tónusok az alapanyag kategóriáját jelzik (l. 5. ábra), a vonal vastagsága a közös vegyületek számát mutatja. c) A hat legautentikusabb alapanyag és alapanyagpár a regionális konyhákban. A csomópont tónusa a konyhát, a vonalak az alapanyagpár relatív gyakoriságát tükrözik

## Végszó

Az élelem-felhasználás, a gasztronómiai és érzékelésbiológiai adathozzáférés hatására egy átfogóan új, már e dolgozatban is említett adatbányászat nyomán felmerült a „computational gastronomy” (számításos gasztronómia) elnevezésű kutatási terület [18] szükségessége.

A lehetséges fejlődésre gondolva talán jelen területre is reményt keltők lehetnek a biológiai, biokémiai receptorokat kiegészítő, a kémiai szenzorokra alapozott elektronikus orrok és nyelvek fejlesztésére vonatkozó kutatások. Ezeket jelenleg a gasztronómiában még nem, de az élelmiszeriparban már igénybe veszik [20].

## IRODALOM

- [1] Braun Tibor, Empíriától a tudományig. Molekuláris és szupramolekuláris gasztronómia, Magy. Kém. Lapja (2011) 66, 113.
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Chemesthesis>
- [3] E. Adler, M. A. Horn, K. L. Mueller, J. Chandrasekar, N. J. P. Ryka, C. S. Zucker, Cell (2000) 100, 683.
- [4] J. Chandrasekar, K. L. Mueller, M. A. Horn, E. Adler, L. Feng, L. Guo, C. S. Zucker, N. J. p. Ryka, T2Rs Function as Bitter Taste Receptors, Cell (2000) 100, 703.
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Umami>
- [6] K. Kupferschmidt, Following the Flavor, Science (2013) 340, 808.
- [7] H. Blumenthal, The Guardian, 2002. május 4.
- [8] H. Blumenthal, The Big Fat Duck Cookbook, Blumsbury, London, 2008.
- [9] <http://www.kiserletikonyha.hu/2009/11/konyvajanlo-fat-duck-cookbook.html>
- [10] <https://www.foodpairing.com/en/what-is-foodpairing/the-science-behind>
- [11] <http://wikipedia.org/wiki/Firmenich>
- [12] <http://blog.khymos.org/about/>
- [13] Handbook of Flavor Characterization: Sensory Analysis, Chemistry and Physiology, CRC Press, Boca Raton 2004.
- [14] B. Nijssen, K. van Ingen, J. Donders, Volatile Compounds in Food, version 10.1.1 (2008), [www.vcf-online.nl](http://www.vcf-online.nl)
- [15] <http://en.wikipedia.org/wiki/Foodpairing>
- [16] <http://www.kiserletikonyha.hu/2012/02/foodpairing-avagy-az-alapanyagok.html>
- [17] Y. Y. Ahn, S. E. Ahnert, J. P. Bagrow, A.-L. Barabási, Flavor network and the principles of food pairing, Sci. Rep. (2011) 1, 196.
- [18] S. E. Ahnert, Network analysis and datamining in food science: the emergence of computational gastronomy, Flavour (2012) 2, 4.
- [19] G. A. Burdock, Fenaroli's Handbook of Flavor Ingredients, 6<sup>th</sup> edition, CRC Press, Boca Raton, 2009.
- [20] E. A. Baldwin, J. Bai, A. Plott, Sh. Dea, Electronic Noses and Tongues: Applications for the Food and Pharmaceutical Industries, Sensors (2011) 11, 4744.

## Gasztromazochizmus

# Csilipaprika-kémia, a Scoville-skála és az ízcsípősségi világrangsor

### Előszó

Hangsúlyoznunk kell, hogy bár hazánkban a különböző paprikafajták termesztése, feldolgozása és fogyasztása különös jelentőséggel bír, sőt *Szent-Györgyi* Nobel-díjas felfedezése révén járulékos tudományos hangsúlyt is kapott, e dolgozat kimondottan a csilipaprikák csípősségére, illetve csípős változataira összpontosít, így a paprikakémia számos, ettől eltérő vonatkozásával nem, vagy alig foglalkozik.

Hasznosnak ígérkezik néha, mint itt is, a múltba visszanyúlni, így például fellapozni *Csapó József* 1775-ben megjelent *Új füves és virágos magyar kert* című könyvét: „Török-bors, paprika, kerti bors. Ezt kertekben termesztik, és eledeleiket avval borsozzák. Hasznára nézve egyebet nem írhatok felőle, hanem hogy igen erős eszköz ez, és ember vérért igen meghevítte. Egyébként ha etetbe vetik a paprikát, az tőle erősebb.” [1]

Ugorjunk innen a huszadik századig, megemlítve, hogy a fáma szerint *Zubin Mehta*, a világhírű karmester mindig tartott magánál csípős (csili-) paprikát egy kis szelencében, és használta még a legelőkelőbb éttermekben, sőt, egy alkalommal II. Erzsébet angol királynő díszvacsoráján is. „Ha nem teszek csípős paprikát az ételbe, magyarázta, úgy érzem, mintha kórházi kosztot ennék.” [2]

Állítják, hogy valószínűleg a csípőst mindenütt íznek tartják, így is nevezik, valójában mégsem az. Mint egyik előző dolgozatunkban említésre került, az elismert ízekhez soroljuk az édes, savanyú, sós, keserű ízeket és ezekhez csatoljuk újabban az umamit, a zsírost és a kalciumot. [3]

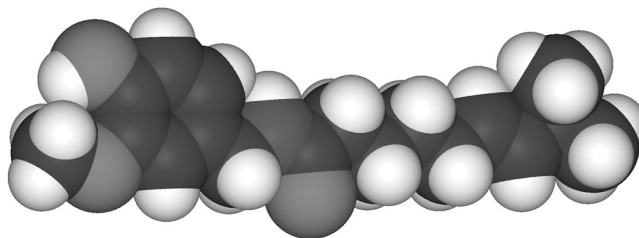
A paprika csípősségét okozó vegyület, a kapszaicin a háromosztatú ideg (*nervus trigeminus*) ingerlésével vált ki égető érzést, fájdalomérzetet. A csípős tehát nem íz, hanem fájdalomérzet, így megkockáztathatjuk a fájdalomélvezet (mazochizmus) fogalmának felvetését is. Ennek a fájdalomérzetnek számos előnyös élvezeti és élettani hatása is akad, amitől a csípős vagy az extrém csípős csilipaprika világszerte kedvelt fűszer. Ettől függetlenül mindenképpen érdekesnek tartjuk, és furcsálljuk, hogy jelen szerző által ismert eddig legalaposabb ízpárosítási tanulmányban [8] a csilipaprikát külön nem említik, ellenben a fekete- és a cayenne-i borsot igen. A csípős fűszerezés megítélése kultúránként, koronként és a hozzáférhető növények elterjedtségétől függően földrajzi területenként is erősen eltérő, azonban az Egyenlítő irányába haladva, a fűszerek növekvő gazdagsága miatt is, a fűszerezés összetettsége és csípőssége is jelentősen nő.

Hazánk konyhaművészetében a csilipaprikák különösen jelentősekké váltak. Már olyan szemszögből nézve is, hogy a szegeci paprikát mindenhol hungarikumként ismerik el (**1. ábra**) [4]. Világszerte a csilipaprikák több ezer fajtáját termesztik különböző méretben, formában, színben, ízben és csípősségben. Például a sárga, narancsszínű és piros színek a növényben az érés közben képződött karotinoid pigmenteknek tulajdoníthatók. Ezek közül több mint huszonötöt azonosítottak a csilipaprikákban. Ilyenek a klorofill-A és a klorofill-B, a sárga-narancsszínű lutein, a zeaxantin, a violakantin, az anteraxantin, a  $\beta$ -kriptoxantin és a  $\beta$ -karotén; a pirosakban jellemzők a kapszaktin, a kapszorubin és a kriptokapszin [9].

1. ábra. A magyar paprikabüszkeség (Szent-Györgyi, C-vitamin) és brand [5–7]



2. ábra. A kapszaicin és kémiai elnevezései: *transz*-8-metil-N-vanillil-6-nonénamid; (E)-N-(4-hidroxi-3-metoxibenzil)-8-metilnon-6-énamid; *transz*-8-metil-N-vanillinon-6-énamid [11]



## Történelem és etimológia

A csilipaprikák már legalább Kr. e. 3500 óta képezik az emberi táplálkozás részét. A legújabb kutatások kimutatták, hogy a csilipaprikákat több mint 6000 éve honosították meg a mexikói Dél-Pueblától és Észak-Oaxától a délkeleti Veracruzig terjedő régióban, ahol az egyik első ott termesztett önbeporzó terményt terjesztették el Mexikóban, Közép- és Dél-Amerika egyes részeiben.

Kolumbusz Kristóf volt az európaiak egyike, aki a karibi térségben találkozott velük. Borsnak (pepper) nevezte őket, mert az Európában Piper genusként ismert fekete- és fehérborshoz hasonlóan, de eltérően más élelmiszerektől, csípős ízt mutattak.

Európába való bevezetésük után a csiliket dísznövényként termesztették a spanyol és portugál kolostorok kertjeiben. Ott a szerzetesek kísérletezni kezdtek a csilik gasztronómiai lehetőségeivel és felfedezték, hogy azok csípőssége lehetőséget nyújt az akkoriban nagyon drága és ezért egyes országokban törvényes valutaként használt fekete bors helyettesítésére.

Kolumbusz után a csiliket az egész világon termesztetni kezdték. Diaz Alvarez Chauca, Kolumbusz 1493-beli második nyugat-indiai utazásának orvosa hozta a csiliborsot (csilipaprikát) Spanyolországba, és 1494-ben orvosi hatásairól is publikált. A csilipaprikák ázsiai elterjedése valószínűleg portugál kereskedőknek volt tulajdonítható, akik ismerve kereskedelmi értéküket, terjesztetni kívánták azokat az akkoriban portugál és arab kereskedők által uralt ázsiai kereskedelmi utakon. Fővárosuk, Lisszabon ugyanis gyakran használt kikötője volt az Amerikába és Amerikából vitorlázó hajóknak. Manapság a csilipaprikák az indiai konyha gyakori elemei. Ezenfelül ellenőrizhető korreláció áll fenn a csilipaprika földrajzi elterjedése és ázsiai fogyasztása, valamint a portugál kereskedők indiai és délkelet-ázsiai jelenléte között. A csilipaprikák súlypontosan szerepelnek a valaha portugál gyarmat indiai Goa tartomány gasztronómiájában. Később a csilipaprikák Indiából, Törökországból Közép-Ázsián keresztül érkeztek Magyarországra, ahol ott paprika [10] néven váltak nemzeti fűszerré.

A csilipaprika a trópusi és szubtrópusi égövön termesztett csípős termésű paprikafajták összefoglaló neve, a több ezer változat közül egyesek a cserjés paprika (*Capsicum frutescens*), mások a közönséges paprika (*Capsicum annuum*), a bogyós paprika (*Capsicum baccatum*) vagy a kínai paprika (*Capsicum chinense*) fajok változatai. [9] A csilipaprikák érésük során először zöldek, de amikor megérnek, legtöbbjük karotenoid pigment vagy pigmentek révén piros színt kap, viszont vannak narancssárga, lila és barna színűek is.

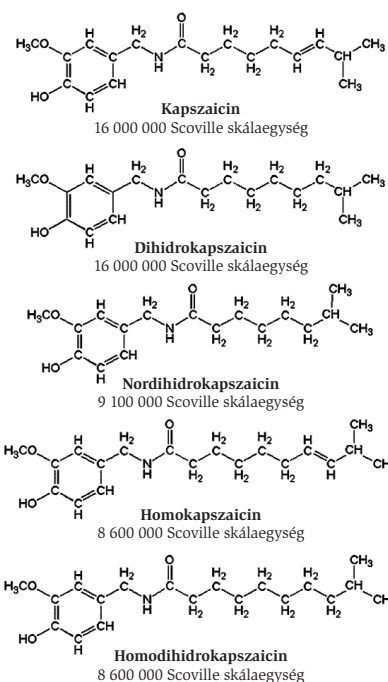
A magyar nyelvben a paprika gyűjtőfogalomként a következő nevek alatt szerepel vagy szerepelhet: cayenne-i paprika, csilipaprika, amerikai paprika, angol paprika, aranybors, guineai bors, magyar bors, macskapöcspaprika, ördög bors. A magyarral és számos más nyelvvel ellentétben az angol nyelvben a *chili pepper* elnevezés többnyire valamennyi ismert paprikafajta termését jelenti, így az édes csemegepaprikáét is. [9]

A paprikát a spanyolok *pimiento*-nak hívták. A magyar *paprika* elnevezés a 18. században (valószínűleg 1724-ben) bukkant fel először írásos emlékeinkben, a bors görög neve alapján lett belőle *peperi*, *piperi*, majd felfedezhető a bors délszláv neve, a *papar* is. [10]

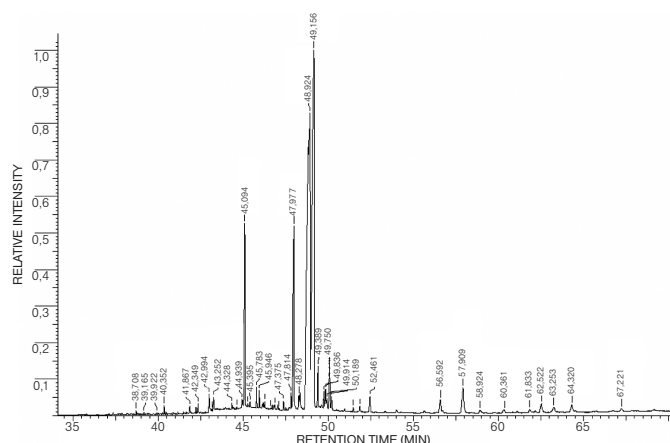
## Kapszaicin, a csilipaprika hatóanyagának kémiája és hatásmechanizmusa

A csilipaprika hatóanyagát meglehetősen tisztítatlan formában először *Christian Friedrich Bucholz* [15] különítette el 1816-ban, és nevezte kapszaicinnek az izoláláshoz igénybe vett *Capsicum* növényfajta alapján. Később *John Clough Tresh* [16] szintén kapszaicinnek nevezve már sokkal tisztább állapotban választotta el 1876-ban, de a kémiai valójában tiszta vegyület szeparálását *Karl Micko* [17] valósította meg 1898-ban, aki tisztázta kémiai összetételét is. Kémiai szerkezetét *E. K. Nelson* határozta meg 1919-ben. A vegyület teljes szintézisére 1930-ig kellett várni (*E. Spath* és *S. F. Darling* [18]). 1961-ben a japán *S. Kosuge* és *Y. Inagaki* [19] csilipaprikákból a teljes, általuk kapszaicinoideknek elnevezett vegyületcsaládot izolálta (**2. ábra**).

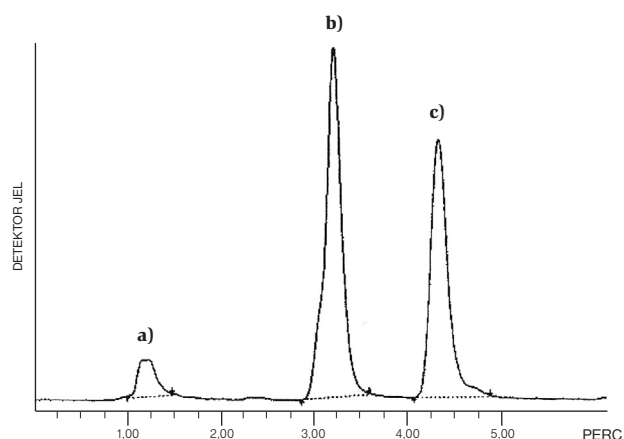
1873-ban *Rudolf Buchhelm* farmakológus, majd 1878-ban a magyar *Hőgyes Endre* [20] írták le, hogy a részben tisztított kapszaicin, az általuk kapszikolnak nevezett



3. ábra. Kapszaicinoid-példák [13]



4. ábra. *Capsicum annuum* acetonos kivonatának gáz-kromatogramja [21]



5. ábra. *Capsicum annuum* acetonitriles kivonatának nagy teljesítményű folyadékkromatogramja; a) pigment, b) kapszaicin, c) dihidrokapszaicin [27]

vegyület égési érzetet okozott a nyálkahártyákon. A kapszaicinoidok (3. ábra) mellett a paprikák (*Capsicum annuum*) oldószeres kivonatai kisebb mennyiségben még számos csípős és nem csípős vegyületet tartalmaznak (4. ábra). Mint a 3. ábrán látható, a kapszaicin fenoltól származó alkaloid, hidrofób szénhidrogén végű vanillilcsoportot tartalmaz. Ez a vanillilcsoport a vanília ízkomponens alapanyagából, a vanillinból származik, de a vanília kóistolása természetesen nem okoz a szájbán a paprikacsípősséghez hasonló égésszerű érzést. A kapszaicinben jelen lévő hidrofób végződés viszont szükséges a vanillilcsoportnak a sejt-hártyába való juttatásához, ahol ez kölcsönhatásba kerülhet a David Julius által felfedezett [22–24] TRPV1 (Transient Receptor Potential Vanilloid) ioncsatornákkal. A nyelven és a szájbán a paprikafogyasztás által érzett égő fájdalomérzetet bonyolult molekuláris mechanizmus hozza létre. A TRPV1, mint a potenciális TRP receptorcsalád tagja, aktiváláskor lehetővé teszi a kationok (különösen a  $\text{Ca}^{2+}$ ) átmeneti beáramlását a nyálkahártyába. A TRPV különböző ösztönzőkkel aktiválható, például hővel ( $> 40^\circ\text{C}$ ), savakkal, vanillinoidokkal (például kapszaicin), gingerollal és endokannabinoidokkal. A perifériális neuronokon lévő TRPV1 aktiválása, mint említettük, a szájbán égő érzést okoz. A TRPV1 a központi idegrendszerben is jelen van, és hozzájárul a testhőmérséklet szabályozásához, valamint a memóriához. Végül a TRPV1 a nem idegi sejtekben is megtalálható, ahol a fájdalomjelzésben és -érzékelésben is szerepet játszik gyulladásos betegségeknél.

A TRPV1-ben hat transzmembrán ankyrin tekerics szolgálja az ingerek érzékelését az 5 és 6 részek között képződő kationpórrussal, ahol a glükózilálás végbemegy. A hő, protonok (sav) és ligandok érzékelésére való kritikus régiók különböznek egymástól. A transzmembrán komplex N-végződéséhez csatolt hat ankyrin tekerics közvetíti a fehérjekötődést. A TRPV1-ről kimutatták, hogy kalmodulinnal, tubulinnal, AKAP156-nél fehérje-kináz D-vel (PEKCM), PKCy-vel, C-Src kinázzal (CSK), neutrofin tirozinkinázreceptor 1-gyel (NTRK1), egy foszforinoritid-megkötő fehérjével (Pirt) és esetleg TRPV3-mal is kölcsönhatásba kerülhet. A TRPV1 899 aminosavja közül ez a 117, 145, 371, 502, 705, 775, 801 és 821 (emberi TRPV1-re vonatkozó számok) maradványain foszforilálható Ser/Thr kinázokkal.

Funkcionálisan a TRPV1 aktiválhatósága a foszforilálási és defoszforilálási jelzések bonyolult egyensúlyából függ. Általában a foszforilálás a receptor aktiválására való érzékenyítést szolgálja, miközben a defoszforilálás a receptort érzéketlenné tesz.

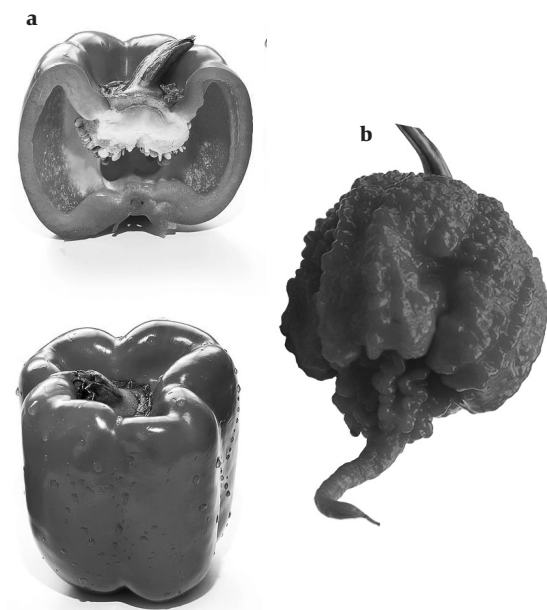
A tiszta kapszaicin szájba kerülésekor az ott lévő idegek ugyanazokat a jeleket közvetítik a nyálkahártyán keresztül az agyba, mint amikor  $43^\circ\text{C}$  fölötti étel kerül a szájba. A test erre endorfin-kibocsátással reagál. Az endorfint boldogsághormonnak is nevezik, jelenléte kellemes érzéssel jár és enyhíti a fájdalmat. Így alakul ki a gasztronómiai mazochista fájdalomélvezet, amiről a címben és az előszóban már említést tettünk.

## A csilipaprika-csípősség mérése, mértéke és a Scoville-skála

A csilipaprikák ízcsípősségének mérésére legelőször Wilbur Lincoln Scoville, az egyesült államokbeli Park-Davis gyógyszergyár vegyész-gyógyszerésze által 1912-ben kidolgozott organoleptikus módszert vették igénybe, és a Scoville-módszer, illetve -skála néven mindmáig használatban van. [26] A Scoville-módszer lényege, hogy a vizsgált paprikából oldatot készítenek, amit addig hígítanak cukros vízzel, amíg a csípős érzést általában öt, elkülönítetten kóstoló bíráló még észleli. A csípősséget tehát a hígítás mértéke határozza meg, vagyis például egy Scoville-skála szerinti 500 000 értékű paprikából készült kivonatot 500 000-szeresére kell hígítani ahhoz, hogy ne lehessen már érezni a csípős ízt. Az angol nyelvű szakirodalomban a Scoville csípősségi skálát Scoville scale-ként, vagy akronimként Scoville Heat Unit-ként (SHU) jelölik. Jelenlegi használata és elterjedtsége ellenére a kóstolási bírálók érzékszervi észlelésére építő Scoville-rendszer hátrányaként pontatlanságát szokták felvetni, az érzékelők időbeni kifáradását és az értékelések szórását említve. És persze azt is, hogy a módszer nem igazán a paprikákban lévő kapszaicinoidok mennyiségét méri.



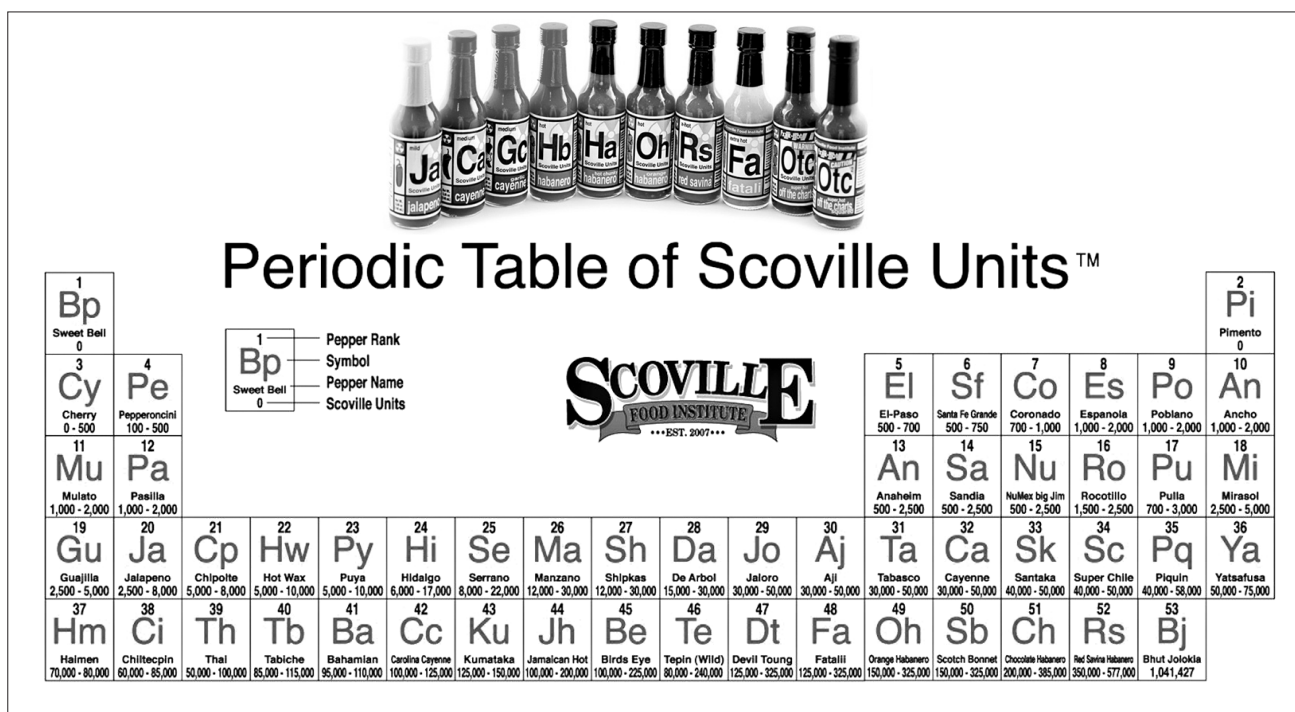
## Csilipaprika-kémia, a Scoville-skála és az ízcsípősségi világrangsor



6. ábra. A csilipaprikák csípősségének két extrém változata.  
a) Bell Pepper [31], b) Caroline Reaper [32]

FAJTA	Helyezés	ERŐSSÉG
Sweet Bells; Sweet Banana; Pimento	0	
Mexi-Bells; New Mexiko; New Mexiko; Anaheim; Big Jim; Peperoncini; Santa Fe Grande; El Paso; Cherry	1	100-1000 Scoville-egység
Coronado; Mumex Big Jim; Sangria; Anaheim	2	1000-1500 Scoville-egység
Pasilla; Mulato; Ancho; Poblano; Espanola; Pulla	3	1500-2500 Scoville-egység
Rocotillo	4	2500-5000 Scoville-egység
Yellow Wax; Serrano; Jalapeno; Guajillo; Mirasol	5	5000-15 000 Scoville-egység
Hidalgo; Puya; Hot Wax; Chipotle	6	15 000-30 000 Scoville-egység
Chile De Arbol; Manzano	7	30 000-50 000 Scoville-egység
Santaka; Pequin; Super Chile; Santaka; Cayenne; Tabasco; Aji; Jaloro	8	50 000-100 000 Scoville-egység
Bohemian; Tabiche; Tepin; Haimen; Chiltepin; Thai; Yatsufusa	9	100 000-350 000 Scoville-egység
Red Savina Habanero; Chocolate Habanero; Indian Tezpur; Scotch Bonnet; Orange Habanero; Fatali; Devil Young; Kumataka; Datil; Birds Eye; Jamaican Hot	10	350 000-855 000 Scoville-egység
Ghost Pepper (Bhut Jolokia aka Naga Jolokia); Trinidad Moruga Scorpion	10	855 000-2 100 000 Scoville-egység

1. táblázat. Paprikacsípősségi világrangsor



2. táblázat. A Scoville-egységek periódusos rendszere

Valamivel pontosabb kolorimetriás módszert dolgoztak ki Gillette és munkatársai 1984-ben [27]. A manapság használatos legpontosabb és legmegbízhatóbb eljárást a nagy teljesítményű folyadékkromatográfia (HPLC) szolgáltatja. Ennek számos változatát dolgozták ki, itt azonban csak egyet említünk [28], amiben például a pigmentet, a kapszaicint és a dihidrokapszaicint határozták meg a *Capsaicum annum* „Punjab Lal” fajtában, amint az 5. ábrán bemutatott folyadékkromatogramon látható. A folyadékkromatográfiai módszert az Amerikai Fűszerkereskedelmi Egyesület (American Spice Trade Association, ASTA) a kapszaicinoidok kvantitatív meghatározására szolgáló hivatalos módszerének tekinti. [29]

A hivatalos ASTA-eljárás együtt méri a különféle csípős vegyületeket, és koncentrációjukat csípősségük intenzitásával súlyozza. Ennek eredményét nem Scoville-, hanem ASTA-csípősség-egységben fejezik ki. Nagyjából 1 ppm (egymilliomod rész) kap-

## Csilipaprika-kémia, a Scoville-skála és az ízcsípősségi világrangsor

szaicinoid 15 Scoville-egységnek felel meg. Az összehasonlítások azt mutatják, hogy a HPLC-értékek nagyjából 20–40%-kal alacsonyabbak, mint a Scoville-skála értékei.

A Scoville-skála szerinti paprikacsípősségi világrangsort számos, néha meglehetősen különböző változatban publikálták, az egyik legrészletesebb közel száz fajta értékeit adja meg. [30]

Az **1. táblázatban** a Scoville-skála szerinti csípősséget nulla és tíz közötti világrangsoron mutatjuk be. Ezt kiegészítendő a **6. ábrán** a csípősségi világrangsor két extrém végét jelentő *Bell Pepper* (Scoville-skála: 0) és a nemrég kitermesztett *Caroline Reaper* (Scoville-skála: 2 200 000) változata látható. Érdekességgént említjük, hogy az egyesült államokbeli Scoville Food Institute publikálta a Scoville-egységek alapján összeállított, és a **2. táblázatban** bemutatott periódusos rendszert. [34] Mint az ábrán is látható, ezt nyilvánvalóan cégreklámként hozták létre az ábra felső részén bemutatott csípős csilipaprikaszószok népszerűsítésére.

## Végszó

Bár itthon az a vélekedés, hogy csilipaprikáink csípősségüket tekintve az élen járnak, ez, mint az *1. táblázatban* látható, távol áll a valóságtól. A legcsípősebb csilipaprikánk úgy 8000 Scoville-egység értékű, az enyhén csípősek pedig körülbelül 500–1000 Scoville-egységnyiek. [25] Ez persze nem jelenti azt, hogy Magyarországnak nem lenne jelentős helye a paprikafajták édestől a csípősig terjedő skálájának termelésében és fogyasztásában.

## IRODALOM

- [1] Csapó József, Új füves és virágos magyar kert, 1775.
- [2] [http://www.rd.hu/Paprika\\_a\\_cs%C3%ADp%C5%91s\\_szenved%C3%A9ly](http://www.rd.hu/Paprika_a_cs%C3%ADp%C5%91s_szenved%C3%A9ly)
- [3] Braun Tibor, Gasztronómiai íz-, illet- és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei, Magy.Kém.Lapja (2014) 11, 347.
- [4] <http://www.alap.hu/index.php/83-olddsite/326-hungarikum-szegedi-paprika>
- [5] <http://www.agroinform.com/aktualis/Indul-a-paprikat-nepszerusito-kampany-a-fogyasztas-novelese-a-cel/20130816-22199/>
- [6] <http://www.sinol.hu/images/paprika1.jpg>
- [7] <http://www.napi.hu/fototar/201111/240/image1321966836.jpg/>
- [8] Y.-Y. Ahn, S. E. Ahnert, J. P. Bagrow, A.-L. Barabási, Flavor network and the principles of food pairing, Sci.Rep. (2011), 1, 196.
- [9] Z. Matus, J. Deli, J. Szabolcs: Carotenoid composition of yellow pepper during ripening: isolation of beta-cryptoxanthin 5,6-epoxide, J. Agric. Food Chem. (1991) 39, 1907.
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Chilli\\_pepper](http://en.wikipedia.org/wiki/Chilli_pepper)
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/Capsaicin>
- [12] <http://www.compoundchem.com/2014/01/15/why-chilli-peppers-are-spicy-the-chemistry-of-a-chilli>
- [13] <http://www.g6csy.net/chile/scoville.html>
- [14] <https://www.caymanchem.com/app/template/Article.vm/article/2116>
- [15] P.A.Bucholz, Almanach Taschenbuch Schneidenkünstler Apotheker, Weimar (1816), 37, 1.
- [16] J. C. Tresh, Pharm. J. (1846), 6, 941.
- [17] K. Micko, Unters. Nahr. Genussm. Gebrauchsgegenstände (1898) 1, 818.
- [18] E. Spath, S. Darling, Chem. Abstr. (1930), 24, 3504.
- [19] S. Kosuge, Y. Inagaki, Nippon Nagei Kagaku Kaishi (1959) 33, 470.
- [20] Hőgyes Endre, Adatok a paprika (Capsicum annuum) élettani hatásához. Orvos-természettudományi Társulat Értesítője, 1877, újra kiadva, Orvosi Hetilap, 1878.
- [21] A. Wesolowska, D. Jadczyk, M. Greszczuk, Chemical composition of the pepper fruit extracts of hot cultivars Capsicum annuum L., Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus (2011), 10, 171.
- [22] M. Constandi, Catching fire, New Scientist (2014) March, 44.
- [23] H. J. Caterina, M. A. Schumacher, M. Tominaga, T. A. Rosen, J. D. Levine, D. Julius, The capsaicin receptor: a heat activated ion channel in the pain pathway, Nature (1997), 389, 816.
- [24] D. Julius, TRP channels and pain, Ann. Rev. Cell. Dem.Biol. (2013) 29, 955.
- [25] <http://people.inf.elte.hu/medtaai/capsiacin.html>
- [26] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Scoville-sk%C3%A1la>
- [27] M. H. Gillette, C. E. Appel, M. C. Lego, A new method for sensory evaluation of red pepper heat, J. Food Sci. (1984) 49, 1028.
- [28] M. D. Collins, L. M. Wasmund, P. W. Bosland, Improved Method for Quantifying Capsaicinoids in Capsicum Using High-performance Liquid Chromatography, Hort-science (1995) 30, 137.
- [29] American Spice Trade Association (ASTA), Official analytical methods of the ASTA, Englewood Cliffs, N.Y., 1985.
- [30] <http://www.pepperseeds.eu/scoville>
- [31] <http://www.chilipepper.com/ScovilleScale/tabid/59/Default.aspx>
- [32] <http://www.crazyhotseeds.com/wp-content/uploads/carolinareaper-seeds.jpg>
- [33] <http://homecooking.about.com/library/weekly/blhotchiles.htm>
- [34] [http://www.geocaching.com/geocache/GC4KE6T\\_guts-glory-pain](http://www.geocaching.com/geocache/GC4KE6T_guts-glory-pain)

# A gasztronómia gyémántja

## Kémiai és történelmi oknyomozás az aranyértékű szarvasgomba világsikeréről

„Diamonds are forever/They won't leave in the night/Have no fear that they might/Desert me”

Don Black: *Diamonds are Forever*, 1971 (a Gyémántok az örökkévalóságnak című James Bond-film címadó dala)

### Előszó

Mint tettük a múltban [1–3], itt is hivatkozhatunk egy klasszikusra: 1826-ban, két évvel halála előtt franciául publikálta „Az ízlelés fiziológiája” (*Physiologie du gout*) című alapművét Jean Anthelm Brillat-Savarin francia jogász és politikus, és tőle származtatják a konyhaművészetet szinonim gasztronómia fogalmát, azaz az ételek, italok szakértő ismeretét, illetve élvezésük művészetét. Ő beleértette a fentiekbe az ételek kifinomult élvezetét és az étkezés művészetét, tágabb értelemben az étkezés kultúráját is, még tágabb értelemben mindannak az intelligens ismeretét, ami összefügg a táplálkozással [4]. Említésre érdemes a gasztronómia angol nyelvű értelmezése is: „gastronomy is the study of food and culture with particular focus on gourmet cuisine” (a gasztronómia az élelmiszerek és a kultúra tanulmányozása, különös tekintettel az ínycsok konyhára) [5]. Mint a továbbiakban kiderül, a szarvasgomba esetében az ínycsok (gourmet) [6] fogalom különösen helytálló.

Feltétlenül méltó megemlíteni a közismert zeneszerző, Gioachino Rossini nevét is, akit kortársai szerint ínycsokként ünnepezhettek volna, amennyiben zenei zsenialitása nem árnyékolta volna be gasztronómiai adottságait.

Életrajzírói anekdotaként jegyezték fel, hogy életében csak háromszor kényszerült hangos zokogásra: először első operájának fiaskójakor, másodszor, amikor meghallotta hegedülni Niccolò Paganinit, és végül, amikor egy hajó fedélzetén ebédelve a tányérján lévő, szarvasgombával töltött pulyka megcsúszva a tengerbe pottyant [6].

Még mindig Brillat-Savarinre és jelen írás címére is utalva hangsúlyozandó, hogy ő a szarvasgombát a konyha gyémántjának nevezte. Tette ezt valószínűleg azért, hogy ezzel „leg”-jellegére, azaz minden ételek egyik legízletesebbjére, legdrágábbjára utaljon. Valamint arra is, hogy szó szerint „aki szarvasgombáról beszél, nagy szót ejt ki, mely a szoknyás nemnél az érzékiség és az ízlelés, a szakállas nemnél pedig az ízlelés és ez érzékiség gyönyöreinek emlékét kelti fel”. (Itt a francia 1826-os, illetve a magyar 1912-es szóhasználat kerül említésre.)

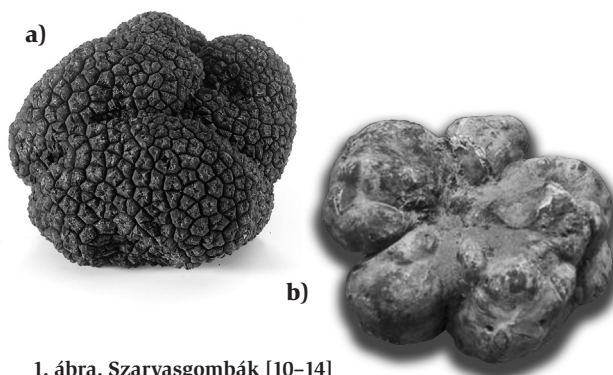
A továbbiakban ezt a „leg” jelleget igyekszünk főleg gasztronómiai körbejárni. A fentebbi definícióban az étkezés művészete, valamint a konyhaművészet [7] is megjelent, ezért érezzük úgy, hogy „sokan vannak, akik természetesen ismerik a konyhaművészet szót, ám úgy gondolják, hogy ennek valójában semmi köze az igazi művészethez, amit nem a konyhában lehet megtalálni, hanem a Louvre-ban, az Uffiziben meg a Royal Albert Hallban. Az ezt hívők is tévedhetnek. Kezdjük az elején. A zeneszerző csakis a 20 Hz és 20 kHz közé eső hanghullámokat használhatja, és semmi más, a festő eszköze a szín, vagy általánosabban fogalmazva az elektromágneses színkép  $3,9 \times 10^{14}$  és  $7,8 \times 10^{14}$  Hz közötti tartománya. A konyhaművész ezzel szemben különféle aromák és ízek [2], valamint technológiák roppant gazdag kínálatából válogat, a kész mű pedig egyszerre hat a látásra, a szaglásra és az ízlelésre, miáltal is a wagneri *Gesamtkunstwerk* szimpla ceruzarajznak tűnik hozzá képest; akkor meg honnan vesszük, hogy elektromágneses, vagy pláne hanghullámokkal lehet művészetet csinálni, viszont anyagok, ízek, illatok, aromák és formák végtelen sokféle kombinációjából válogatva ugyanez kizárt? Mért gondoljuk, hogy amit csak látással, vagy hallással észlelünk, az lehet művészet, viszont amit ízleléssel és szaglással is, az nem?” [8]

A fentiek jegyében érezzük különösen indokoltnak, hogy jelen dolgozatban pont az ínycsok szakirodalmi bővületében próbáljunk utánajárni a történelem, valamint a kémia oldaláról, hogy mi indokolhatja világszerte a szarvasgomba gyémántjellegét, aranyárát és ízének, aromáinak dicsőítését, imádatát a gasztronómiában, illetve a konyhaművészetben.

### Bevezetés

Az angol *truffle* szó a latin gumót, csomót, rögöt jelentő *tuber*-ből származik, ami később *tuferré* változott és különböző európai kifejezéseként *truffe* (francia), *trufa* (spanyol) *Trüffel* (német) *truffel* (holland) és *Le Trifole* (piemonti) került a nyelvhasználatba. Portugáliában a *trufa* és a *tubera* szinonimaként használatos, utóbbi közeli lévén a latin kifejezéshez. A német *Kartoffel* (krumpli) az olasz *tartuffó*-ból származik, és az alaki hasonlóságnak tulajdonítható. A magyar szarvasgomba, régiesen *trifla*, *gimgomba*, *kutyaorr-gomba*, *trufola*, *földi kenyér* a legenda szerint onnan ered, hogy a szavak a nyári párázás előtt ettől a gombafajtától kapnak új erőt.

Tudományos név	Hazai elnevezés
Fekete szarvasgombák	
<i>Tuber aestivum</i> Vittad	Nyári szarvasgomba
<i>Tuber brumale</i> Vittad	
<i>Tuber macrosporum</i> Vittad	
<i>Tuber mesentricum</i> Vittad	Mezentrikus szarvasgomba
<i>Tuber melanosporum</i> Vittad	Périgord-i fekete szarvasgomba
<i>Tuber uncinatum</i> Vittad	Burgundiai szarvasgomba
Fehér szarvasgombák	
<i>Tuber magnatum</i> Pico	Piemonti fehér szarvasgomba
<i>Tuber borchii</i> Vittad	Blanquette



1. ábra. Szarvasgombák [10–14]  
a: fekete (périgord-i) b: fehér (piemonti)

#### 1. táblázat. Szarvasgombafajták

A szarvasgomba – a tölgyfák, nyárfák, mogyoróbokrok és különféle cserjék gyökereivel szimbiózisban élő aszkomicetes gombák föld alatti gyümölcssterméke – úgy él, hogy azok gyökereihez kapcsolódik. A fák és cserjék könnyebben jutnak ásványi anyagokhoz a gombák segítségével, a gomba viszont más tápanyagokat, például cukrot kap a gyökértől. A szimbiózis következtében ektomikorizának nevezett módosított gyökerek jönnek létre. A szarvasgomba általában 10–30 centiméternyire a föld alatt él, ezért nem könnyű megtalálni. A föld alatti *Ascomycetes* fajtához körülbelül 6400 species tartozik, ezek közül körülbelül 63 ehető változat terjedt el az egész világon, közülük körülbelül 20 Európában. A fajták leírásában és főleg az Európában termesztettek számáról a mikológusok között viták állnak fenn [9], a leggyakoribbakról az 1. táblázat mutat be néhány példát.

A szarvasgombák különböző fajtáinak rendszerezése elsősorban a termék olyan morfológiai jellemzőin alapszik, mint alak, méret, szín, peridium díszítése, illat és íz.

Az 1. táblázat csak bemutató jellegű, de megjegyezzük, hogy a körülbelül 63 változat közül Olaszországban 25 van jelen, ám azok közül csak 9 ehető és 5-öt forgalmaznak: *Tuber magnatum* Pico, *Tuber melanosporum* Vitt., *Tuber aestivum* Vitt., *Tuber Borchii* Vitt., és *Tuber Brumale* Vitt.

A fehér szarvasgomba (*Tuber magnatum* Pico) a szarvasgombák íze és kereskedelmi fontossága miatt a legismertebb. Gömbszerű alakját a peridium számos rücske szabálytalanná teszi. Külső felülete sima és enyhén bársonyos. Színe az enyhe krémszíntől a sötét krémszínen keresztül a zöldesig változhat. Húsa (belseje) összetéveszthetetlen, színe fehér vagy zöldessárga, amit fehér vénák járnak át. Illata kellemesen aromás és más szarvasgombáktól eltérően nincs fokhagymaszzerű mellékillata, ez egyedülállóvá teszi. Gyűjtése szeptembertől decemberig történik.

A fekete szarvasgombának (*Tuber melanosporum* Vitt.) meglehetősen sima a felülete, poligonális dudorokkal. Téli változatának felülete teljes érettségénél bíborvörös-fekete árnyalatot mutat. Leginkább Franciaországban (Périgord, Vancluse) és Norciában, illetve Umbriában található. Ezért Norciai és Périgord-i fekete szarvasgombának is nevezik. Húsa tiszta, illata intenzív, aromás és gyümölcsös. Decembertől márciusig gyűjtik.

A fekete nyári szarvasgomba (*Tuber aestivum* Vitt.) néha nagyméretűre nő és méretre hasonlít a fekete szarvasgombához, külső felületén barna piramidális rücskökkel. Illata kellemesen aromás, de felvágva az különbözteti meg a fekete téli változattól, hogy a glebája nem sötétedik, hanem sötét sárga színt vesz fel.

A Bianchetto (*Tuber Borchii* Vitt.) Marzuollo szarvasgombaként is ismert Toszkánában, Piemont és Marche tartományban terem. Külsőleg a *Tuber magnatum*-mal téveszthető össze, mert első látásra hasonló karakterisztikumokat (szabálytalanság, simaság, és piszkosfehérség) mutat, de attól eltér, mert érés után sötétebbé válik. Az illata az azonban, ami megkülönbözteti a fehér szarvasgombától, mivel lágy és kellemes az elején, de idővel a fokhagymáéhoz hasonlóvá válik. Begyűjtési ideje januártól márciusig tart.

A fekete téli szarvasgombát (*Tuber Brumale* Vitt.) gyakran tévesztik össze a fekete szarvasgombával, mert ugyanazt a habitatot (környezetet) és növényi szimbiontákat (szimbiózistársakat) osztják. Barnásfekete, enyhén varacskos felülettel. Belülről a húsa sötétedik kiemelve a fehér vénákat. Illata szerecsendiós és temperált klímájú helyeken terem [10]. (1.a–b. ábra, 2. ábra)

Hazánkban a nyári szarvasgomba (*Tuber aestivum*) honos, ami a legelterjedtebb, de jelentősebb mennyiségben terem a téli szarvasgomba (*Tuber brumale*) is. De megtalálható itthon a ritka és piros húsu, vagy isztriai szarvasgomba (*Tuber magnatum*) is [14]. A szarvasgombák titkainak a felderítéséhez tartozik az a világszerte intenzív kutatás, amit a témáról több száz folyóirat-cikkben publikáltak [15]. Különösképpen megemlítendő, hogy a gyorsabb, olcsóbb és pontosabb génszekvenálások révén [16] 2010-ben felderítették a fekete szarvasgomba teljes genomját [17]. A genom 125 millió bázispárt tartalmaz, 58%-a változó elemekből áll, amiből csak 7500 a fehérjekódoló gén.

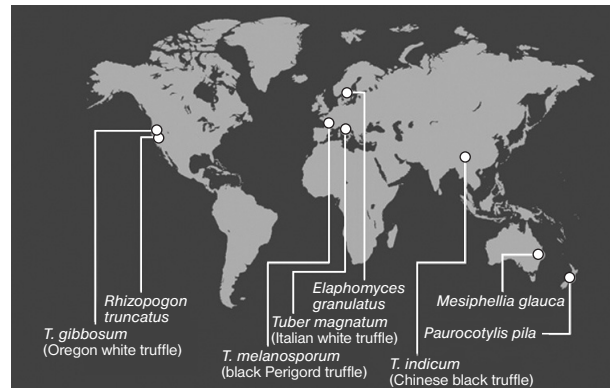
## A szarvasgomba ára

Nem szeretnénk e kérdés részleteinél túl hosszan elidőzni, és csak a dolgozat címében is megemlített aranyár igazolására jegyezzük meg, hogy az árat nagymértékben meghatározza a szarvasgomba fajtája, mérete, termesztésének földrajzi helye és természetesen a minősége. Ez utóbbi aromájától, illatától és organoleptikus, illetve kóstolási és kulináris tulajdonságaitól függ.



Sorszám	Terület	(Forgalom \$1000)	Termelés (MT)
1	Kína, szárazföldi	9 291 928	5 150 000
2	Olaszország	1 416 342	785 000
3	Amerikai Egyesült Államok	700 864	388 450
4	Hollandia	553 907	307 000
5	Lengyelország	396 936	220 000
6	Spanyolország	263 421	146 000
7	Franciaország	210 329	116 574
8	Irán (Iszlám Köztársaság)	158 188	87 675
9	Kanada	147 949	82 000
10	Egyesült Királyság	131 891	73 100

2. táblázat. Az első tíz szarvasgomba-termelő ország (2014)



2. ábra. Szarvasgombák fő lelőhelyei a világban [18]

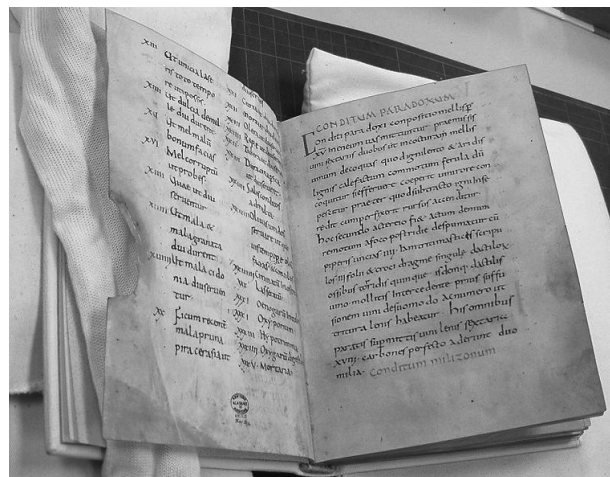
A fentieket pontosítva meg kell jegyezzük, hogy a szarvasgombát jelenleg is a világ egyik legdrágább élelmiszereként tartják számon [19]. Lévén, hogy a kínálat-kereslet jegyében az árak állandó kisebb-nagyobb változás alatt állnak, a részletesebb adatokat itt mellőznénk, de megemlítjük, hogy például 2014-ben az európai eredetű fehér szarvasgomba ára körülbelül 3600 dollár volt fontonként. Az már csak az érdekességek vagy különlegességek kategóriájába tartozik, hogy a talált szarvasgombák mérete jelentős árfelverő jelleggel bír, például egy darab, az olaszországi Umbria tartományban talált 1,89 kg súlyú fehér szarvasgombáért a New York-i Sotheby's-nél rendezett árverésen a kezdő 50 000 dollár után egy tajvani licitáló 61 500 dollárt fizetett [20]. Ez persze még nem a világrekord, ugyanis szintén megemlíthető, hogy 2007-ben egy makaói kaszinótulajdonos egy körülbelül hasonló súlyú piemonti példányt 330 000 dollárért vásárolt meg [21]. A fentebb említett csillagászati ára ellenére a szarvasgomba termelése a világban hatalmasnak mondható, mint azt a 2. táblázat adatai is bizonyítják. Meg kell azonban jegyezni, hogy a táblázat adataiban felsorolt mennyiségek rendkívül széles körű organoleptikus és gasztronómiai minőségi változatosságot takarnak.

## Gasztrotörténelem

A szarvasgombának a legelső civilizációk óta része volt az emberi táplálkozásban. Az első írásos feljegyzés egy mezopotámiai tartomány 4000 éves sumér szövegében található, amiben amorita ellenségeik étkezési szokásairól írtak [22]. Később a szarvasgombát a görögök (*epiküroszi* élvezetként) és a rómaiak dicsérték, mint azt *Theophrasztoz* (i. e. 371–287), *Plutarkosz*, *Lucius Lucullus* és a közismert ínyenc és szakács, *Marcus Gavius Apicius* [23] (i. e. ~20) dokumentálták (3. ábra). Érdekes megjegyezni, hogy abban az időben gyakran főzve, illetve meglehetősen csípős ételekkel együtt tálalták, mint ahogy az *Apicius* következő receptjében szerepel: „szózd meg a szarvasgombát, majd tűzd nyársra, hogy tűzön enyhén megsüthesd. Tegy forró vízbe zöld olajat, kevés bort, borst és egy csepp mézet. Sűrítésként tegyél bele lisztet. Húzd le a szarvasgombákat a nyársról, hengergesd meg a fenti mártásban ... tálald” [23].

Már a klasszikus időkben a szarvasgomba rejtélyként és kihívásként állt az emberek előtt. A babilóniaiak i. e. 3000-ben kutattak utána a tengerparton és a sivatag homokjában. Szívesen ette *Aphrodité*, a szerelem istennője, és *Leukaszi Philoxenosz* volt az első, aki annak afrodiziákumi erejéről beszélt. *Plutarkhosz* azt tartotta, hogy a szarvasgomba villámlás, meleg és víz eredménye a talajban, míg *Juvenalis* a dörgést és az esőt tekintette keletkezése alapjának. *Cicero* a föld gyermekeinek, *Dioszkoridész* gumós gyökereknek vélte azokat. Akkori legendák szerint a szarvasgomba azon a ponton születik, ahol a *Zeusz* által vetett mennykő-csapások érik a földet.

A Római Birodalom összeomlásakor, úgy tűnik, hogy a szarvasgomba elvesztette hírnevét és vonzerejét, és csak parasztok használták ételeik ízesítésére. A középkorban az élelmiszereket annak alapján minősítették, hogy létezésük, vagy termőszintjük milyen közel van a talajhoz. Ennek értelmében a madarak (szárnyasok) és a gabonák (föld fölöttiek) „közelebb” voltak a Jóistenhez, és ezért a nemességnek szánva, míg mindent, ami a föld alatt termett, sátninak tekintettek, ennek megfelelően a pa-



3. ábra. A fuldai (Németország) monostorban őrzött és 1929-ben a New York-i Orvosi Archívum által megszerzett Apicius-kézirat [23]



4. ábra. Szarvasgombát kereső sertés [25] és kutya [26]

5. ábra. Szarvasgomba-kereső elektronikus orr  
sematikus ábrázolása [27]

asztoknak juttatva [24]. A szarvasgomba sötét kora azonban a pápákkal és az irántuk való vonzalmukkal ért véget a 14. században, újra érdeklődést talált, amikor Avignonban és ezáltal Provence tartományban a klérus közel került hozzá. Szarvasgomba-vadászat említésre kerül *Bartolomeo Platina* pápai történetésznél 1481-ben is, amikor megemlítette, hogy a sertések utolérhetetlenek a szarvasgomba-vadászatban. A szarvasgomba híre tovább emelkedett *I. Ferenc* és *II. Henrik* korában, akik számos banketten tálalták és valószínűleg ezáltal került étrendi élvezetként sok híres séf és konyhaművész készítményeibe a reneszánszban. Akkorra tehető, hogy főleg a francia konyha eltávolodott a „nehéz” keleti ételektől, s felfedezte az élelmiszerek, így a szarvasgomba természetes aromáját. A szarvasgomba 1780 felé már nagyon népszerűvé vált a párizsi piacokon. Rendszeresen szállították belföldre és külföldre az azokat már hivatásszerűen kiásó gombászok. Rövidre rá említhető *Brillat-Savarin* dicsőítő könyvének megjelenése, amiben már a szarvasgomba iránti szuperlatívuszokkal jelölt étkezési vonzalmáról és magas áráról is említést tesz hangoztatva, hogy ritkasága és ára miatt a föld fekete gyémántja csak a nagy nemesek és kitartott hölgyek asztalán jelenhetett meg.

A *Napkirály, XIV. Lajos* főként előételként fogyasztotta a borban főzött szarvasgombát. A velencei nőfaló *Giacomo Casanova* szerelmi légyottjai előtt gyakran fogyasztott belőle készített ragut. Bizott előnyös hatásában *Bonaparte Napóleon*, ezért gyakran szerepelt étrendjében abban az időben, amikor fiú utódot kívánt nemzeni. Vágykeltő képességében a szerelmi csaták olyan művelői hittek még, mint a leghíresebb királyi szeretők, *Madame de Pompadour* és *Madame du Barry*, valamint a szexuális szabadság hírnöke, *De Sade* márki. A 19. század végén *Giuseppe Gibelli*, a torinói egyetemen a mikorizzák felfedezése folytán kezdett el gondolkodni a szarvasgomba mesterséges termesztésén, és azt később számos helyen már iparszerűen üzték.

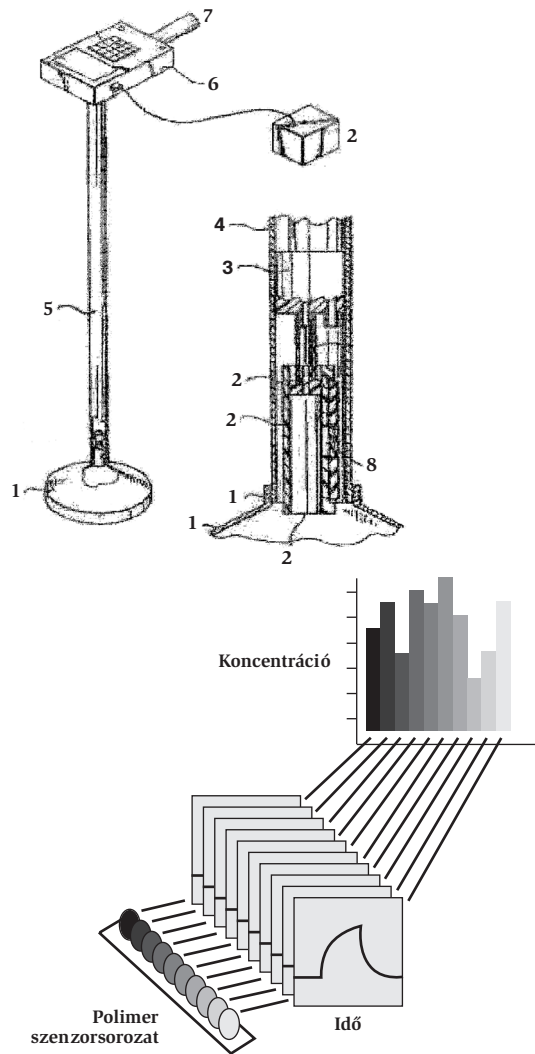
## A szarvasgomba keresése (vadászata)

Nincs könnyű dolga annak, aki segítség nélkül akarja keresni a szarvasgombát. Jelenlétére árulkodó jelek persze vannak, például a már említett fa- és borkorfajták töve, illetve egyes esetekben a szarvasgombatelep felett nagy területen kiégett fű. Nyomra vezethet, hogy a gomba növekedése során megrepeszi (feltúrja) a talajt, és ezek a repedések láthatóvá válnak, ha az avart elkotorják. Máskor apró legyek, szúnyogok vagy vadtúrások jelzik a gombát. Jobb eredményt érnek el segítőtársakkal vagy technikai eszközökkel. A hagyományos önkéntes nyomravezető a sertés (4. ábra). Nem kell tanítani (idomítani), mert imád szarvasgombát enni. Ez egyben a legnagyobb hátránya is, mert a megtalált gombát maga szeretné elfogyasztani. Ebből kifolyólag gyakran kerül sor összetűzésre sertés és gazdája között. Itt általában a sertés húzza a rövidebbet, de nem mindig (harapások). A kutyát (4. ábra) viszont nem igazán érdekli a szarvasgomba, keresésére az állatot meg kell tanítani. Ennek egyik módszere, hogy előbb a kedvenc csemegéjét ássák el és kerestetik meg vele, aztán a csemege mellé szarvasgomba is kerül – végül a földbe már csak a gombát tesszik, a csemegét a gazdája kezéből kapja a kutya, minden megtalált gomba után. Keresésre használnak például vizslát: jól keres, de szíve szerint inkább vadászna. A labradorban kevesebb a vadászösztön, az ő figyelmét inkább az egérlyukak terelik el.

És végül a jövő: világsszerte nagy erővel, bár egyelőre még szerényebb eredményekkel folyik a kutatás gyakorlatban használható elektronikus orr (elektronikus szagelemző) és szarvasgomba-aromát jelző (5. ábra) berendezés kifejlesztésére [28]. Ilyen berendezések szabadalmi bejelentés [29] tárgyát is képezték, és ezek közül egyet mutatunk be a 6. ábrán. Hasonló elven működő fejlettebb berendezést a közelmúltban ismertettek [30].

## Szarvasgomba-életten

Az előbbieken említettük, hogy 2010-ben sikerült felderíteni a szarvasgomba teljes genomját [17], itt sem szeretnénk túl hosszasan a szarvasgomba biológiájával foglalkozni. Annyi azonban feltétlenül említést érdemel, hogy a szarvasgomba termesztése és vadászata (szüretelése) köztudottan nem gépesíthető. Sőt, a valóságban a szarvasgomba egyáltalán nem termesztendő (ültethető). Egy szarvasgombatermelő nem „ültet” szarvasgombát. Ő ugyanis tölgyfákat ültet, a szarvasgomba, mint itt már szintén említésre került, csakis bizonyos fajok (például tölgy) gyökereinek közelében nő. Legjobb esetben öt, vagy valószínűbben tíz évvel a fa ültetése után a gazda sertéssel, kutyával, vagy elektronikus orral a fa gyökere körüli föld alatt megkísérli szarvasgombát keresni. Néha talál, néha nem. Az 1970-es években francia biológusok rájöttek, hogyan olthatnak be facsemetéket szarvasgomba-spórakkal és ezzel növelik az esélyt, hogy a csemeték szarvasgombát termeljenek. Amikor ugyanis a szarvasgomba-spórák kapcsó-



6. ábra. Szarvasgomba-kereső elektronikus berendezés [29], polimer érzékelősorozat és aromakijelzés szarvasgombát kereső elektronikus orrhoz [30].

1. tölcser, 2. mintafelszívó fej, 3. szivattyú, 4–5. tölcser-cső, 6–7. fogantyú és mikroszámítógép, 8–9. polimer érzékelők

iránti szexuális érdeklődése gombaillat-komponensének feltételeztek. A kóktélmintákból egyeseket különböző helyeken egy tölgyfa gyökerei közé temettek, valódi szarvasgombákat ugyanúgy más helyekre ástak el, és végül az androsztenol-mintákat harmadik helyekre. Azt tapasztalták, hogy a sertések az androsztenol-minták iránt semmilyen érdeklődést nem mutattak, míg a kóktélt és valódi szarvasgombákat kiásták. A fentiekből azt a következtetést vonták le, hogy a sertések vonzódása a szarvasgomba irányába nem szexuális eredetű.

## Illat, aroma, kémiai összetétel

Nem könnyű elindulni ennek a kérdésnek az ismertetésekor, főleg akkor, ha az irodalomban a szarvasgombát nem kevesen rejtélyként kezelik. „Truffles are a mystery... You cannot define the smell of a truffle. It is magic.” (A szarvasgombák rejtélyesek... A szarvasgomba illata meghatározhatatlan. Mágikus.) [31]

Amennyiben ennyivel megelégszünk, a további vizsgálatok reménytelenek lennének, hiszen a megmagyarázhatatlanra a rejtély és mágia fogalmak mindent felülírnak. A helyzet azonban nem ennyire egyértelmű. Több olyan irány is adódik, amin elindulva jelentős ismereteket szerezhethetünk a szarvasgombák rejtélyéről. Az egyik bizonyos analógiát vesz igénybe a borok illat- és aromavizsgálatából. Azon a területen ugyanis Ann C. Noble, a daviszi Kaliforniai Egyetem „érzékelő kémikusa” (sensory chemist), miután tanulmányozta a borkóstolás módszereit és azok alkalmazását, azt tapasztalta, hogy nem létezett objektív általános elfogadottságú keretszemlélet ahhoz, amit egy borkóstoló leírhat, például jellemezzen olyan karakterisztikumokat, mint „földes” (earthy) aromák, vagy gyümölcsös illatok, amikkel azonosíthatnák a különböző borokat. Ez irányú kutatásai során elért ered-

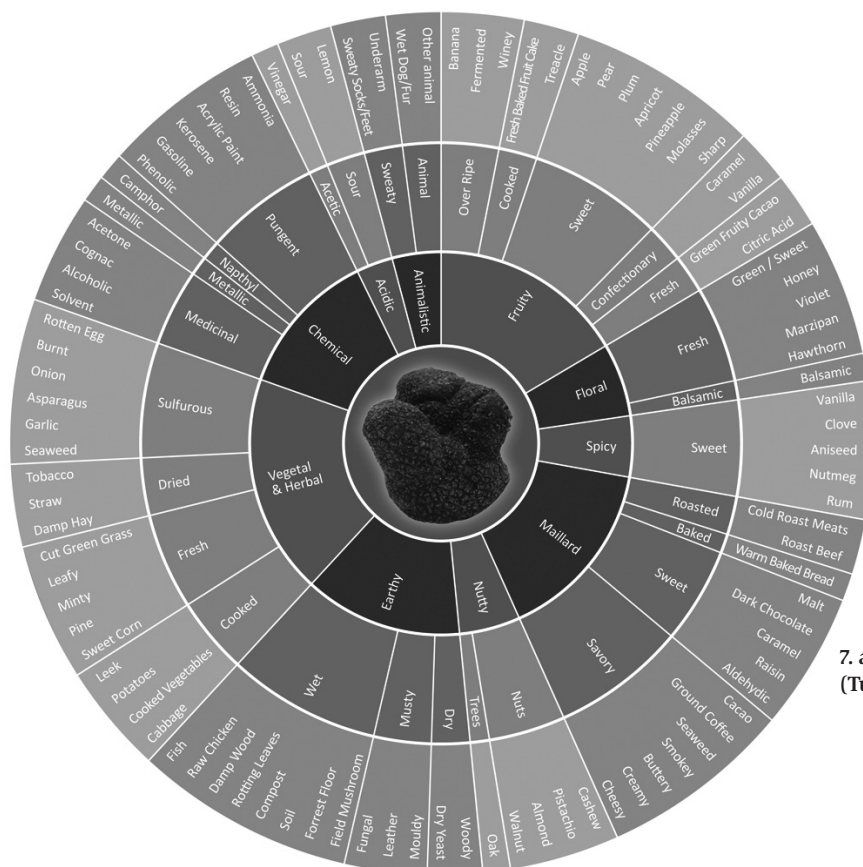
latba kerülnek egy, a tölgyfa gyökeréből kinövő hajszálvékony gyökérszállal, még vékonyabb mikroszkopikus szálcáskát növesztenek, ami körbetekeredik a gyökéren. Eredményeképpen nagyítás alatt a gyökér göndörnek és enyhén megdagadtnak tűnik, és a gyökér pamutpamacsához hasonlít. A megdagadt gyökérvéget nevezik „mikorizzá”-nak a görög gombagyökéret jelentő szóból eredően. Ez egyaránt része a szarvasgombának és a fának. Az összes más gombához hasonlóan a szarvasgombák képtelenek cukrokat vagy más szénhidrátokat szintetizálni, ezeket más növényektől kell kapják. Közöséges fehér gombák holt növényeket kolonizálnak, ezért könnyen természetűek ipari méreteken komposztban. Más gombák, mint például a penészek, paraziták, elszívják a növényektől a szénhidrátokat anélkül, hogy bármit adnának cserébe. A szarvasgomba adakozóbb. Elszívja a fáktól a szénhidrátokat, amiket olyan szájak növesztésére használ, amik a talajon átfurakodva újabb fagyökérszállakat keresve, hogy egy szövényszerűen gyarapodó gombahálózatot alkossanak, de egyúttal valamit visszaszolgáltat. A szálcáskákkal átfont gyökérpamacsok a pamacs nélküli gyökereknél sokkal eredményesebbek a talajból való mikrotápanyagok felvételében. Ez a barátságos szövetkezés (szimbiózis) elengedhetetlen, ugyanis eddig senkinek sem sikerült fa nélkül szarvasgombát „in vitro”, laboratóriumban termesztetni.

Egy adott időpontban, valószínűleg, amikor a fa alatti hálózat elér egy bizonyos sűrűséget (általában májusban) nemi aktus játszódik le. Azt még a biológia mindaddig nem tisztázta, hogy egy hím- és egy nőnemű szálcáska gyümölcsképzésre összeolvad, vagy ehető szarvasgomba képződhet egyetlen hermafrodita szálcáskából is. A gyümölcs belseje fekete színűvé válik, fehér vénákkal átszöve, és maga a gomba növekedve eléri a körülbelül 30–60 g súlyt, sőt néha (ritkán) az 1 kilogrammnyit is. Ezután a növekedés leáll, és a gomba beérik. Lényegében spórazsákká válik decemberig és ekkor már erős szagot (illatot) áraszt.

Az illat, aroma a gomba biológiájának elengedhetetlen része, nélküle a növény képtelen lenne a spórák (magok) terjesztésére és létének fenntartására. Az illattal a gomba magához vonzza a legyeket, szúnyogokat, földtűró állatokat, azok szállítják, illetve elfogyasztják, majd a spórákat máshol elejtik vagy ürítik általában egy még nem kolonizált tölgyfa alatt. A szarvasgomba „szexuális termesztése” miatt valószínűleg itt kellene foglalkoznunk azzal, hogy a sertések már említett különleges érdeklődésének van-e az illat folytán szexuális motivációja. Francia kutatók [31] kimutatták, hogy e feltételezés alaptalan. Miután azonosítottak nyolc vegyületet a szarvasgomba aromájában, azokból aromakoktélt keverték, de abba nem adagoltak androsztenolt, amit addig mások a sertések gomba



## A gasztronómia gyémántja



7. ábra. A périgord-i szarvasgomba  
(*Tuber melanosporum*) tárcsa [34]

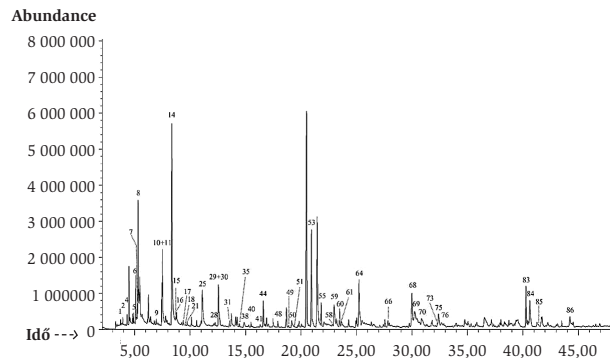
ményei alapján 1984-ben kidolgozott egy borok jellemzését megkönnyítő, lehetővé tevő eszközt, amit „aromatárcsá”-nak (*Aroma Wheel*) nevezett el [33]. Az *aromatárcsa* 12 kategóriára osztja a borok aromáit és azokat újabb olyan aroma alkategóriákra osztja, amik megtalálhatók a fő kategóriákon belül. A *Noble-féle bor-aromatárcsa* általánosan használatossá vált világszerte, és magát a tárcsát számos borfajtára jellemzően állították össze. A szarvasgombához visszatérve, és illata, illetve aromája jobb átláthatóságára gondolva népies kifejezéssel állíthatjuk, hogy a jó példa ragadós. Ugyanis a Nyugat-ausztráliai Egyetemen a borra vonatkozó *aromatárcsa* mintájára 2014-ben összeállították a *Tuber Melanosporum* (périgord-i fekete szarvasgomba) „*aromatárcsáját*” (7. ábra). A fekete szarvasgombában felfedezett és azonosított, körülbelül 220 aroma közül a legjellemzőbb 42 aromavegyület tüntették fel az *aromatárcsán*. Ezek főleg különféle arányban észterek, alkoholok, aldehidek és dimetilszul-fidok, amik megadják a szarvasgombák jellemző bukéját és aromáját. Jelen szerző szerint jelenleg egyedül az említett fekete szarvasgombafajtára állítottak fel *aromatárcsát*. Az ausztrál kutatók azt írták az *aromatárcsáról*, hogy azt az érdeklődők, elemzők lexikonként, illetve adatbázisként használják a fekete szarvasgomba aromabukéját jellemző kifejezésekre és karakterisztikumokra [34].

A különböző szarvasgombák *illékony szerves komponensei* (*volatile organic compounds, VOC*) kémiai analízisének nagy és bő-  
sleges irodalom áll rendelkezésére. Helyhiány miatt annak ismertetéséről itt eltekintünk, de megemlíjtjük, hogy a mérésekhez ál-  
talanban oldószerextrakciós, szilárd bázisú mikroextrakciós (*solid-phase microextraction, SPME*) és gőztéranalízises (*head space*  
*analysis, HSP*) feltárást és a közismert gázkromatográfiás és tömegspektrometriás módszereket vették igénybe. A **8. ábra** egy  
*Tuber aestivum* szarvasgombából kivont illékony szervesanyag-kivonat (HSA, SPME) kromatogram-tömegspektrumából mutat  
be példát [35]. Mint látható, részben a spektrumon is, a mintában több mint 50 vegyületet azonosítottak, többek között számos  
alkoholt, aldehidet, észtert, ketont, aromás és kénes csoportot. A **3. táblázatban** a szarvasgombafajok aromavegyületeinek azo-  
nosítása követhető nvomon.

Természetesen nem törekedhettünk itt annak az intenzív tudományos kutatásnak, a szarvasgombák illat- és aromakomponenseinek részletes felderítésére és bemutatására, ami a múlt század 80-as éveiben kezdődött és a mai napig is tart. Az illó szerves vegyületek (ISZV) és aromák képződése a szarvasgombában bonyolult ökológiai, bioszintetikus és kémiai folyamatok eredménye, mint azt példaként, egy bioszintézis modellen, a **9. ábra** bemutatja [36]. Elismerten a DMS (dimetilszulfid) a fő vonzó illat a sertések és kutyák számára, míg például az 1-oktén-3-ol biojelző a növények irányában. Az ökológiai folyamat és az ISZV-k bioszintézise részleteinek teljes tisztázása még nem valósult meg mindmáig, pedig az létfontosságú lenne fogyasztási preferenciák és a gasztronómiai, konyhaművészeti világsiker megértéséhez, illetve e dolgozat címében is megemlíttetek magyarázatára. Bár nem térünk ki a részleteire, de feltétlenül meg kell említenünk itt egy rendkívül részletes és alapos vizsgálat eredményeit [38], amit magyar kutatók végeztek a Magyarországon termett *nyári szarvasgomba* (*Tuber aestivum*) és *téli szarvasgomba* (*Tuber brumale*) ISZV-k azonosítására és összehasonlítására. Ebben 20 egyedi kémiai osztályba tartozó 144 illékony szerves vegyületet mutattak ki és határoztak meg (**10. ábra**).

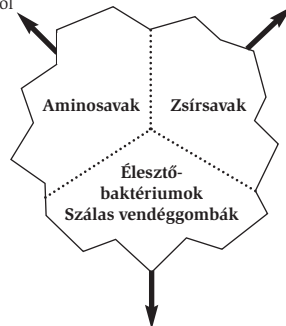


## A gasztronómia gyémántja



8. ábra. A *Tuber aestivum* mikroextrakciós tömegspektrometriás gázkromatogramja [35]

- $C_2H_4$  jelek a növények felé
- S-ISZV-DMS vonzó kutyák és sertések felé
- 2-metil-1-butanol
- 3-metil-1-butanol
- 2-metil-1-propanol
- 2-feniletanol
- 1-oktén-3-ol jelek a növények felé
- más ISZV-k



9. ábra. Szarvasgombák kémiai ökológiai és aroma-bioszintézis modellje [36]



11. ábra. Organoleptikus szarvasgomba vizsgálat a Nyugat- ausztráliai Egyetemen [40]

Végül ennél a fejezetnél röviden említést kell tennünk a szarvasgombákra vonatkozó organoleptikus vagy szaglásvizsgálatokról, amit erre a célra kiképzett és meghatározott szabályok szerint végeznek el szakértők, mint azt például a *Nyugat-ausztráliai Egyetemen* láthatóan a 11. ábra mutatja be [34, 40].

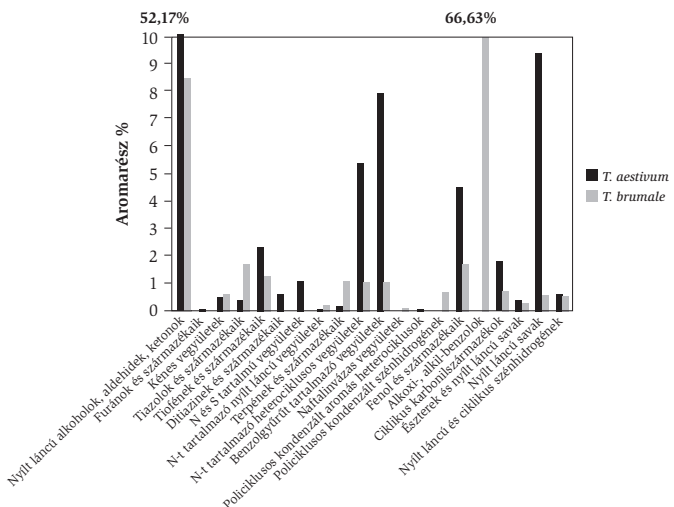
## Szarvasgomba-hamisítás

Ismerve az emberi természetet és a drága, keresett árucikkek, beleértve az ilyen élelmiszerek és mezőgazdasági termékek iránti igényeket világszerte, szokatlan, sőt furcsa lenne, ha a szarvasgomba hamisítását nem kísérelték, illetve nem valósították volna meg. Erre vonatkozóan, a rövidség kedvéért, csak két példát említenénk. Az egyiknél hivatkoznánk e dolgozat 2. táblázatára, amin láthatjuk a valóban hatalmas mennyiségű kínai szarvasgomba termelést. Ez esetben az alacsony gasztronómiai és aroma/illat-

Illat	Azonosító	Becsült szint (pg/g gomba)	
		Fekete szarvasgomba	Nyári szarvasgomba
Szarvasgomba, kén	Dimetiszulfid	185	8
Szarvasgomba, kén	Dimetildiszulfid	meghatározatlan	meghatározatlan
Vaj, tejfel	2,3-Butándion	676	5
Gyümölcsös, zöldalma	Etilbutirát	5	5
Gyümölcsös, ánizs	Etilmetil-butirát	864	5
Fémes	l-Hexén-3-on	5	5
Sajt	3-Metil-1-butanol	432	5
Gomba	l-Oktén-3-on	5	5
Hagyma, húszűz	2-Metil-3-furantiol	5	5
Rothadt étel	Dimetil-triszulfid	75	5
Földes, porszerű	l-oktén-3-ol	275	5
Főtt burgonya	Metional	5	5
Fenolos, bőr	3-Etil-5-metilfenol	18 000	4
Benzin, fenolos	5-Metil-2-propilfenol	2500	5
Sajt	Vajsav	5	4
Zsíros, viaszos	E,E-2,4-Dekadienal	8	6
Fenolos, vegyszeres	Gvajakol	5	5
Rózsák	$\beta$ -Feniletanol	3400	71
Pamut, cukros	Furaneol	5	6
Fenolos, bőr	p-Krezol	4	4
Bőr, állati	3-Etilfenol	1200	8
Fenolos, bőr	3-Propilfenol	4	5

3. táblázat. Fekete (*Tuber melanosporum*) és nyári (*Tuber aestivum*) szarvasgombák által körülbelül 7,5 óra alatt kibocsájtott aroma-vegyületek gázkromatográfiás és olfaktometriás azonosítása [37]

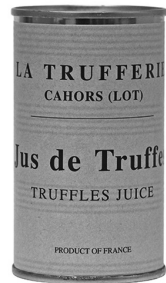
10. ábra. A Magyarországon termelt nyári (*Tuber aestivum*) és téli (*Tuber brumale*) szarvasgombákban azonosított aroma-vegyület osztályok [38]



## A gasztronómia gyémántja



12. ábra. Szarvasgombával ízesített étkezési (főleg olíva-) olajok, vajak és krémek



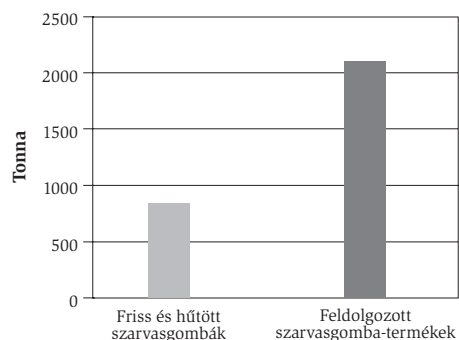
13. ábra. Néhány példa szarvasgombával fűszerezett gasztronómiai ínyencségekre

értékű *Tuber indicum*-ról van szó, amivel Kína elárasztja a világot, és amit általában, külső hasonlósága folytán périgord-i fekete szarvasgombaként (*Tuber melanosporum*) igyekeznek értékesíteni. A nyilvánvaló hamisításon túlmenően azonban nagyobb és komolyabb problémát jelent, hogy magukkal a gombákkal együtt terjesztett spórák invazív ökológiai terjedését figyelték meg Európában, sőt Périgord-ban is [18]. Az említett két szarvasgomba minőségét tekintve ég és föld [41–43]. Azt mondják, hogy ehhez képest a Kínában koppintott iPhone, Rolex óra, vagy hamis Vuitton, sőt, a Kínában termesztett és palackozott Chateau Lafitte Rothschild pezsgő is korrekt ajánlat, hiszen például a kínai iPhone-nal lehet telefonálni, már amíg szét nem esik, a kínai Chateau Lafitte Rothschild pedig olyan, amilyen, de legalább olcsó, ellentétben a kínai szarvasgombával, amit a *Tuber melanosporum* árában igyekeznek értékesíteni. A különbség az ízben és illatban mutatkozik meg, minthogy a kínai szarvasgombának jóformán semmi illata sincs, míg a périgord-i *Tuber melanosporum* illata lehengerlően csábos és roppant intenzív. Annyira átható, hogy a mellette tárolt tojáshoz is finom szarvasgomba illata lesz, és persze nemcsak a tojáshoz, hanem az együtt tárolt szagtalán kínai szarvasgombának is [44]. Persze így is hamisítják a kínai szarvasgombát, „együttléti szagosítással”, périgordival illatosítva.

## Szarvasgombatermékek

Ugyancsak a 2. táblázat adataira hivatkozva látható és feltételezhető, hogy a világ felsorolt országaiban termelt szarvasgombát nemcsak frissen fogyasztják, hanem annak egy része feldolgozásra kerül. A feldolgozás leggyakoribb változata a különféle étolajok, elsősorban extraszűz olívaolajok nyers, jó minőségű szarvasgombával való ízesítése. Ugyancsak szarvasgombával ízesítenek különböző vajakat, liba- és kacsamájkrémeket, mustárokat, sőt asztali sókat is. Az ilyen termékekből mutat be egy csokrot a 12. ábra.

Az elektronikus (internet) és a nyomtatott (szakácskönyvek) irodalom telítve van szarvasgombát felhasználó receptekkel. Ezen felül szarvasgombát tartalmazó gasztronómiai költeményeket rengeteg étterem kínál (változatos árakon) vendégeinek. Nem célunk itt, de lehetetlen is lenne ezekről összefoglalást készíteni. Ezért csak nagyon dióhéjban mutat be néhány egyszerűbbet a 13. ábra. Az Ausztrál Mezőgazdasági és Kutatógazdasági Iroda közzétette [45], hogy Olaszország, Franciaország, Spanyolország és Kína a világ legnagyobb szarvasgomba-exportáló országai, míg Franciaország, Japán, az Egyesült Államok, Németország és Svájc a legjelentősebb importálók. A 14. ábra a világ friss és feldolgozott szarvasgomba termelését mutatja be.



14. ábra. Szarvasgombák és feldolgozott szarvasgombatermékek világkereskedelme [45]

## Utószó

Ahhoz, hogy a dolgozat címében felvetett oknyomozás eredményét megkíséreljük a gasztronómia szémszögéből összegezni, szembesülnünk kell a ténnyel, hogy a szarvasgomba a legtöbb embernek azonnal ízlik, ellenben másoknak inkább furcsa és meglepő az első találkozás. Ehhez már szinte közhelyként kell hozzátennünk, hogy az ízlés és ízlelés annyiféle lehet, ahány embert kérdezzünk róla. A szarvasgomba aromái rendkívül sokféle és változatos ízanyagainak vitathatatlanul szerepe van abban a vonzalomban, ami az emberekben a szarvasgomba irányában kialakul. Nem kétséges, hogy mindezek mellett a szarvasgomba gasztronómiai kvalitásairól kialakult mítoszok is hatnak. Sőt, mindezeket tetézi a drága, ritka luxustermékekkel kapcsolatos, vitathatatlanul világszerte jelen lévő sznobizmus.

## A gasztronómia gyémántja

De a tényeket figyelembe véve *Alain Ducasse*, a világhírű séf és vendéglőtulajdonos úgy véli, hogy például a fekete szarvasgomba illata, olfaktorikus erényei sokkal fontosabbak, mint az ízük [46] és az ezt ismertető közleményben az obskurus jelzőt is használják, amikor úgy jellemzik, mint „*truffle, that obscure object of desire*” (szarvasgomba, a vágy titokzatos tárgya). A realitásokhoz visszatérve valószínűleg a legérdekesebb, hogy a szarvasgomba gasztronómiai történelme folyamán valamikor a 17. század idején (sajnos, a dátum ennél jobban nem pontosítható) a szarvasgomba élvezetében nagy változás állt be, amikor a szarvasgombát gasztronómiai (konyhaművészeti) nyersanyag (l. például *Apiciust*, *Rossinìt* és magát *Brillat-Savarint* is) helyett *fűszerként* kezdték használni és az a változás mindmáig tart. Úgy véljük, és ez jelen dolgozat legjelentősebb következtetése, hogy a szarvasgomba gasztronómiai világsikerének az alapja fűszerként való bevezetése, illetve használata. Ehhez persze az is óhatatlanul hozzátartozik, hogy főzés, sütés helyett nyersen, reszelve, vagy hajszálvékonyra szeletelve fűszerként kerül főtt, illetve sült ételekre, ételekbe, azaz gasztronómiai alkalmazásra.

### IRODALOM

- [1] Braun Tibor, Empíriától a tudományig. Molekuláris és szupramolekuláris gasztronómia. Magy. Kém. Lapja (2011) 66, 114.
- [2] Braun Tibor, Gasztronómiai íz-, illat- és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei, Magy. Kém. Lapja (2014) 69, 347.
- [3] Braun Tibor, Gasztromazochizmus. Csilipaprika-kémia, a Scoville-skála és az ízcsípősségi világrangsor, Magy. Kém. Lapja (2015) 70, 85.
- [4] J. A. Brillat-Savarin, Az ízlelés fiziológiája, Springer és Wolfner, Budapest, 1912.
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Gastronomy>
- [6] [http://wikiszotar.hu/wiki/magyar\\_ertelmezo\\_szotar/%C3%8Dnyenc](http://wikiszotar.hu/wiki/magyar_ertelmezo_szotar/%C3%8Dnyenc)
- [7] Váncsa István szakácskönyve, Ezeregy recept, Vince Kiadó, Budapest, 2003.
- [8] <http://www.culturekiosque.com/opera/features/rafeat1.htm>
- [9] A. Mello, C. Murat, P. Bonfante, Truffles: much more than a prized and local fungal delicacy, (2006), 260, 1.
- [10] <http://www.trufflespecialty.com/en/truffles.html>
- [11] <http://images.sciencedaily.com/2013/12/131204112014-large.jpg>
- [12] [http://www.truffle.co.za/wp-content/uploads/2012/09/b10-truffle\\_asset\\_mgmt.jpg](http://www.truffle.co.za/wp-content/uploads/2012/09/b10-truffle_asset_mgmt.jpg)
- [13] <http://www.truffle-uk.co.uk/images/products/tn/trf17643.jpg>
- [14] <http://www.rawstory.com/rs/wp-content/uploads/2014/12/db0cb250cab4140d41f72-39dcfaeffd06ef2b2ab-800x430.jpg>
- [15] M. Gajos, D. Hiszczanska, Research on truffles: Scientific journal analysis, Sci. Res. Essays (2013) 8, 1837.
- [16] Braun Tibor, Moore törvénye és a DNS-szekvenálás legújabb kori fejlődése, Magy. Kém. Lapja (2014) 69, 309.
- [17] F. Martin, A. Kohler, C. Murat, R. Balestrini, P. M. Coutinho, O. Jaillon, B. Montanini, E. Morin, B. Noel, R. Percudani, B. Porcel, A. Rubini, A. Amicucci, J. Amselem, V. Anthouard, S. Arcioni, F. Artiguenave, J.-M. Aury, P. Ballario, <http://www.nature.com/nature/journal/v464/n7291/full/nature08867.html> – a11, A. Bolchi, A. Brenna, A. Brun, M. Buée, B. Cantarel, G. Chevalier, A. Couloux, C. Da Silva, F. Denoeud, S. Duplessis, S. Ghignone, B. Hilselberger, M. Iotti, B. Marçais, A. Mello, M. Miranda, <http://www.nature.com/nature/journal/v464/n7291/full/nature08867.html> – a14, G. Pacioni, H. Quesneville, C. Riccioni, R. Ruotolo, R. Splivallo, V. Stocchi, E. Tisserant, A. R. Viscomi, A. Zambonelli, <http://www.nature.com/nature/journal/v464/n7291/full/nature08867.html> – a13, E. Zampieri, B. Henrissat, M.-H. Lebrun, F. Paolocci, P. Bonfante, S. Ottonello, P. Wincker, Périgord black truffle genome uncovers evolutionary origins and mechanisms of symbiosis, Nature (2010), 464, 1033.
- [18] <http://www.nature.com/scientificamerican/journal/v302/n4/images/scientificamerican0410-78-15.jpg>
- [19] <http://www.cbsnews.com/news/truffles-the-most-expensive-food-in-the-world/>
- [20] AFP, New York 2014.
- [21] [http://www.today.com/id/40430251/ns/today-today\\_food/t/two-truffles-fetch-k-why-smelly-delicacy-so-pricey/#.VMiqadKG9LA](http://www.today.com/id/40430251/ns/today-today_food/t/two-truffles-fetch-k-why-smelly-delicacy-so-pricey/#.VMiqadKG9LA)
- [22] J. Pagnol, La Truffe, Ed. Minerva (Aubanel), Genf, 2000.
- [23] <http://en.wikipedia.org/wiki/Apicius>
- [24] B. Duc-Maugé, B. Duplessy, Le Livre de la Truffe, Ed. Edisud, Aix-en-Provence, 1998.
- [25] <http://pixel.nymag.com/content/dam/slideshows/2012/11/truffle-hunting/pig-truffle-hunting.jpg>
- [26] <http://www.morish.com.au/assets/images/Blog%20Photo%20Gallery/truffledog.jpg> [http://si.wsj.net/public/resources/images/OB-UG982\\_TRUFFL\\_H\\_20120823063543.jpg](http://si.wsj.net/public/resources/images/OB-UG982_TRUFFL_H_20120823063543.jpg)
- [27] <http://www.villamagnatartufi.com/insights/methods-find-truffles-part-iv/>
- [28] <http://www.escholar.manchester.ac.uk/uk-acman-sc:34364>
- [29] Feltalálók: T. Talou, K. C. Persaud, A. Gaset, Electronic equipment for detecting truffles|uses polymeric detectors whose electrical resistance varies with amount of volatile material in air, FR2696236 (B1) – 1994-12-02, Application number: FR1992-001163Y, 1992.09.28
- [30] D. Zampoglou, J. Kalomiro, Design and testing of an electronic nose sensitive to the aroma of truffles, chapt. 4, in V. Haasz, K. Madani (Eds), Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing, Rivers Publishers, 2014.
- [31] <http://discovermagazine.com/2000/nov/featbiology>
- [32] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2010.03528.x/>
- [33] [http://en.wikipedia.org/wiki/Ann\\_C.\\_Noble](http://en.wikipedia.org/wiki/Ann_C._Noble)
- [34] <http://www.abc.net.au/news/2014-09-29/truffle-aroma-wheel-launched/5776082>
- [35] P. Diaz, E. Ibanez, F. J. Senorans, G. Reglero, Truffle aroma characterization by head-space solid-phase microextraction, J. Chromatog. A. (2003), 1017, 207.
- [36] R. Splivallo, S. Ottonello, A. Mello, P. Karlovsky, Truffle volatiles: from chemical ecology to aroma biosynthesis, New Phytologist (2011) 189, 688.
- [37] L. Culleré, V. Ferreira, B. Chevret, M. E. Venturini, A. C. Sánchez-Gimeno, D. Blanco, Characterisation of aroma active compounds in black truffles (*Tuber melanosporum*) and summer truffles (*Tuber aestivum*) by gas chromatography-olfactometry, Food Chem. (2010) 122, 300.
- [38] M. Kiss, M. Csóka, J. Györfi, K. Korány, Comparison of the fragrance constituents of *Tuber aestivum* and *Tuber brumale* gathered in Hungary, J. Appl. Bot. Food. Qual. (2011) 84, 102.
- [39] R. Splivallo, N. Valdez, N. Kirchhoff, M. Castiella Ona, J.-P. Schmidt, I. Feussner, P. Karlovsky, Intraspecific genotypic variability determines concentrations of key truffle volatiles, New Phytologist (2012) 194, 823.
- [40] G. Lee, Determination of key volatiles in Australian Black Truffles aroma by combined GCMS and organoleptic techniques, Powerpoint lecture, <http://www.truffle-growers.com.au/wp-content/uploads/2012/09/GaryLee20120617-ATGA-Daylesford-small.pdf>
- [41] <http://www.washingtonpost.com/wpdyn/content/article/2006/12/17/AR200612170-0890.html>
- [42] <http://www.nytimes.com/1992/02/29/world/carpentrasjournalcounterfeittrufflesandalizesouthernfrance.html>
- [43] <http://www.smithsonianmag.com/ist/?next=/travel/truffletroubleineuropetheinvaderwithoutflavor93721732/>
- [44] <http://www.origo.hu/tafelspicc/recept/20141008szarvasgombareceptekvancsaistvan.html>
- [45] B. Lee, Australian Government, Rural Industries Research and Development Corporation, Taking Stock of the Australian Truffle Industry, RIRDC Publication No. 08/124, RIRDC Project No. PRJ-002643, July, 2008.

# Mikrobiális gasztronómia

## Erjesztéses ízgerjesztés baktériumokkal, baktérium közösségekkel, gombákkal és penészekkel

### Előszó

Vitathatatlan, hogy a gasztronómia jelentős fejlődést mutat napjainkban [1] *Brillat-Savarin* által röviden definiált [2] ételek, italok szakértő megismerését és kifinomult élvezetét illetően, valamint több olyan új kutatási vonatkozásában is, amiket előző dolgozatainkban igyekeztünk körvonalazni [3–5]. Jelen munkánkban figyelmünk fókuszában a gasztronómia áll, annak a mikrobák, a mikrobiális erjesztés (fermentáció) vonatkozásában, de választ keresünk a bakteriális erjesztéssel kialakítható ismert és új ízek, aromák, illatok, zamatok létrehozásának lehetőségeire és keletkezéseik mechanizmusára.

A főcím szempontjából először az angol nyelvben már használatos, tudvalevően angolul is újkeletű „*Cellular Gastronomy*” [6] igénybevételére gondoltunk, de etimológiai óvatosságból eltekintettünk „*Celluláris gasztronómiává*” való magyarosításától annak ellenére, hogy talán megtehettük volna, mert a baktériumok (*Bacteria*) definíciójában, miszerint azok „egysejtű, pár mikrométeres mikroorganizmusok” [7] jelen van a *sejt*, illetve angolul a „*cell*” kifejezés. Különböző a magyar nyelv meglehetősen bőkezű e téren, szinonimaként ugyanis felváltva használja a baktérium, bacillus, mikroba és mikroorganizmus elnevezéseket. Itt nem tudunk, de nem is kívánunk eltekinteni témánk ezekkel foglalkozó irodalmi kapcsolatától, illetve könyvtől, *Paul De Kruif: Bacillusvadászok* (1. ábra) (angol címe: *Microbe Hunters*) [8] örökérvényű, a két világháború között és után számtalan kiadásban



1. ábra. A Paul De Kruif-könyv címlapja [8]

megjelent bestselleréről, aminek hatására fiatal olvasók generációi, beleértve jelen dolgozat szerzőjét is, már zsenye életkorban komoly érdeklődést kezdtek mutatni a természettudományok, a tudományos kutatás és a kutatók (tudósok) iránt. E könyv és az általa kiváltott érdeklődés a mikrobák felfedezése és a természettudományos kutatás iránt megjelenésekor olyan hazai nagyságunk, mint *Karinthy Frigyes* érdeklődését is felkeltette, aki a kötetről és az abban ismertetett kutatók nézeteinek elfogadására vonatkozó harcairól írt könyvismertetést [9]. Nagyon röviden még a bacillus kifejezésre visszatérve megjegyezhetjük, hogy abból talán a jelenlegi napi nyelvhasználatban sokan egyféle patogén zöngét vélhetnek érzékelni. Erre, jelen dolgozatra vonatkozóan persze egyáltalán nincs ok, alátámasztásként hadd említsük a *Lactobacillus*-t, aminél szelídebb mikrobiológiai individuumot elképzelni sem tudnánk, lévén, hogy csaknem mindegyikünk napi étrendjében is gyakran jelen van.

A következőkben röviden körbejárandó a bakteriális fermentáció fogalma, miszerint az „*olyan kémiai folyamat, amelyben valamilyen szerves étanyagot egy enzim hatásának tesztünk ki, szénhidrátok lebontását jelenti, amelyet mikroorganizmusok (élesztők, penészek, baktériumok) végeznek, hogy saját élettevékenységükhöz energiát termeljenek*” [10]. Hadd említsük még, hogy az említett *De Kruif*-könyv vonzón ismerteti *Antoni van Leeuwenhoek* 17. századbeli holland (Delft-i) várostervező és amatőr kutató munkásságát, aki már akkor alapos beszámolókat küldött az angol *Royal Society*-nek az általa feltalált optikai mikroszkópban megfigyelt mikrobákról, és szót ejtünk arról, hogy a könyv megemlíti *Paul Ehrlich* bacillusva-

dász tudós összefonódó kutatási eredményeit is a mikrobák és a bakteriális erjedés terén. E dolgozat címében említettek közül az ízek és ízgerjesztés kapcsán pontosításként kell megjegyeznünk, hogy azokkal itt kimondottan az élelmiszerek (gasztronómia) és a probiotikumok mikrobiológiai vonatkozásaiban foglalkozunk. Ehhez az is hozzájárul, hogy a világszerte fogyasztott élelmiszerek makrotápanyagai, mint például a fehérjék, szénhidrátok és zsírok gasztronómiailag túlságosan nagy molekulákból állnak ahhoz, hogy különlegesen élvezetesen gerjesszék íz- és szagreceptorainkat. Miután az erjesztésében a mikrobák ezeket kisebb molekulákká tördelik, például aminosavakká, zsírsavakká, cukrokká, amilázokká, stb., ez utóbbiak receptoraink kellemseneknek tekinthető gasztronómiai élményekhez vezetnek, és új vegyületeket, és ezáltal új íz- és aromalehetőséget hoznak létre. A bakteriális élelmiszer-mikroorganizmus kultúrák starterek (1. később) és probiotikumok között oszlanak meg. „*A probiotikumok olyan táplálékkiegészítők, melyek az emberi szervezet szempontjából jótékony baktériumokat tartalmaznak.*” [11]. A latinból származó név: a *pro* az ért-et, vagy azért-et, a *bios* az életet jelenti.

Ezek után, számítva arra, hogy nem vonjuk el a figyelmet e dolgozat fő témáiról, említést tennénk egy másik ide vonatkozó, lírainak is mondható, de nagyon találó kapcsolatról. *Kurt Vonnegut Jr.*, a világhírű író saját ötvenedik születésnapjára írt „*Bajnokok reggelije*” című sci-fi regényében [12] két erjesztőbaktérium az élet értelméről filozofál, miközben szép lassan megfulladnak, saját



## Mikrobiális gasztronómia

**Kelet- és Délkelet-Ázsia:** amazake, atchara, bai-ming, belacan, burong mangga, com ruou, dalok, doenjang, douchi, jeruk, lambanog, kimchi, kombucha, leppet-so, narezushi, miang, miszo, nata de coco, nata de pina, natto, naw-mai-dong, oncom, pak-siam-dong, paw-tsay-nob, prahok, ruou nep, sake, seokbakji, soju, szójaszós, illatos tofu, szecsuaní káposzta, tai-tan tsoi, chiraki, tape, tempeh, totkal kimchi, yen tsai, zha cai.

**Közép-Ázsia:** kumis (kancatej), kefir, shubat (tevetej).

**Dél-Ázsia:** achar, appam, dosa, dhokla, dahi (yogurt), idli, kaanji, vegyes savanyúság, ngari, hawaichaar, jaand (rizs-sör), sinki, tongba, paneer.

**Afrika:** erjesztett köleskása, garri, hibiscus seed, csípőspaprika szósz, injera, lamoun makbous, laxoox, mauoloh, msir, mslalla, magolajak, ogi, ogili, ogiri, iru.

**Észak- és Dél-Amerika:** élesztős kenyér, oltott tej, chicha, elderberry wine, kombucha, pickling (savanyított zöldségek), sauerkraut, lupin mag, magolajak, csokoládé, vanília, tabasco, tibicos, pulque, mikyuk.

**Közép-Kelet:** kushuk, lamoun makbous, mekhalel, torshi, boza.

**Európa:** rakfisk, sauerkraut, savanyított uborka, surströmming, mézsör, elderberry bor, szalámi, prosciutto, oltott tej, túrók, quark, kefir, filmjöl, crème fraîche, smetana, skyr.

**Óceánia:** poi, kaanga pirau (erjesztett kukorica), sago.

### 1. táblázat. Erjesztett élelmiszer és gasztronómiai termékek földrajza\*

\* Ismeretlen nevek feloldása: Wikipedia

űrülékükben (váládékukban, termékükben), de végig fogalmuk sincs arról, hogy vita közben gasztronómiai pezsgőt állítanak elő.

Alapvetően Vonnegut fekete humora karikírozza, miként vesznek részt a kellemes (pezsgő = ital) ízét létrehozó erjesztésben a mikrobák.

Vonnegutot igazolva állíthatjuk, hogy minden élelmiszerben hasonlóan zajlik le a fermentáció, azaz az elszaporodó gombák és/vagy baktériumok a kiindulási élelmiszer alapanyag bizonyos alkotóelemeiből (molekuláiból) táplálkoznak, majd váládékat (új molekulákat) termelnek (Kurt Vonnegut ezt fentebb csúnyább szóval jellemezte). A váládék egy, vagy több újabb baktérium kultúrájának tud kedvezni, ami hatására egy, vagy több új mikroorganizmus szaporodik el (újabb és újabb molekulákat termelve), majd így folytatódhat tovább a hosszabb-rövidebb láncolat, amíg ki nem alakul egy végső, domináns íz-, illat-, aroma-, zamat-molekulaegyüttes, illetve baktériumkultúra, vagy el nem hálnak a gombák és baktériumok a saját termékükben a kellemes gasztronómiai ízegyüttes létrehozása közben [13].

Az emberi táplálkozás és az erjesztett, illetve a bakteriólisan ízgerjesztett élelmiszerek közötti – költőien fogalmazva – románc a történelem során nagyon régen, mondhatnánk már a Neolitikumban kezdődött. Az ókori görögök bőségesen fogyasztottak például savanyú káposztát, a Balkánon, Kelet-Európában és az Ural hegységtől keletre a népek kefir, kvaszt, természetes joghurtot ettek és bort ittak. A koreaiak kialakították az általuk kimcsinek nevezett erjesztett csípős kínai kelkáposztát (erről részletesebben később), miközben a japánok étrendjében az ősidőktől kezdve számos erjesztéses gasztronómiai termék és savanyúság szerepelt (1. táblázat). De ugyancsak fermentálással állítottak és állítanak elő számos helyen a világban például bort, sört és eceteket, de természetesen sajtokat is (2. táblázat). Egyik előző dolgozatunkban [4] részletesen kitértünk arra, hogy a világ gasztronómiai élelmiszerfogyasztása ízkeverékek vonatkozásában földrajzilag mennyire különböző lehet. Ami a földrajzi eloszlást illeti, az fokozottan így van az erjesztett gasztronómiai termékekben is, mint az az 1. táblázatban jól látható. Sőt már nem is a földrajzi változatosságra, hanem mindennapi étkezésünk napszaki szekvenciálására gondolva például arra, hogy reggelire bakteriólisan elfogyasztunk némi *Saccharomyces cerevisiae* és talán egy falásnyi *Lactobacillus*. Ebédre adagnyi *Acetobacter*, vagy *Lenconoc mezenteroides*, majd vacsorára megint valamiképpen *S. cerevisiae*. Persze a történelmi erjesztési múlt tekintetében feltétlenül meg

### 2. táblázat. Élelmiszerek és italok erjesztésére használt starter lactobacterium kultúrák [16]

Erjesztett élelmiszerek	Starterek
Lyuk nélküli kemény sajtok	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> ; <i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i>
Kislyukú sajtok	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> ; <i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> var. <i>diacetylactis</i> ; <i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> ; <i>Leuconostoc menenteroides</i> ssp. <i>cremoris</i>
Svájci és olasz sajtok	<i>Lactobacillus delbrueckii</i> ssp. <i>lactis</i> ; <i>L. helveticus</i> ; <i>L. casei</i> ; <i>L. delbrueckii</i> ssp. <i>bulgaricus</i> ; <i>Streptococcus thermophilus</i>
Vaj és iró	<i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> ; <i>Lactococcus lactis</i> ssp. <i>lactis</i> var. <i>diacetylactis</i> ; <i>L. lactis</i> ssp. <i>cremoris</i> ; <i>Leuconostoc mesenteroides</i> ssp. <i>cremoris</i>
Joghurt	<i>L. delbrueckii</i> ssp. <i>bulgaricus</i> ; <i>Streptococcus thermophilus</i>
Probiotikus erjesztett sajt	<i>L. casei</i> ; <i>L. acidophilus</i> ; <i>L. rhamnosus</i> ; <i>L. johnsonii</i> ; <i>Bifidobacterium lactis</i> ; <i>B. bifidum</i> ; <i>B. brevis</i>
Kefir	<i>L. kefir</i> ; <i>L. kefirianofacies</i> ; <i>L. brevis</i>

## Mikrobiális gasztronómia

kell még említeni, hogy a fermentálás nemcsak az emberi táplálkozás, a gasztronómiai élvezkedés, hanem az emberiség egyik legősibb élelmiszertartósítási módszere is.

Nem tudunk eltekinteni a számszerűsítéstől sem, ezért megemlíjtjük, hogy az *Egyesült Nemzetek* által végzett *Global Biodiversity Assessment* vizsgálat szerint a földön élő baktériumfajták számát nagyjából egymillióra becsülik, ezek közül körülbelül 4500-at írtak le és jellemeztek. A földi mikrobiális élet mennyisége  $5,0 \cdot 10^{30}$  (quintrillió) mikrobasejt darabra tehető. Ez a szám például nyolc nagyságrenddel nagyobb, mint a világegyetemben (univerzumban) megfigyelt csillagok száma [14].

Mindezek ismeretében és a továbbiak érdekében említést kell tennünk még a mikrobiális ökológiáról, amin a mikrobák közösségeit, egymás közti kapcsolatait, valamint a környezetükkel való kölcsönhatásokat értjük [13]. Végül fontos megjegyeznünk, hogy jelen dolgozatban kizárólag azokkal a mikroorganizmusokkal foglalkozunk, amik az étellel és étkezéssel, illetve a gasztronómiával kapcsolatosak, illetve kompatibilisek. Így hangsúlyozottan kizárásra kerülnek a patogén mikrobafajták és a vírusok.

### Erjedés, fermentáció (dióhéjban)

Az élelmiszer erjedés, erjesztés nyomtatott és elektronikus szakirodalma tengernyi, ezért kell hangsúlyoznunk a fenti dióhéjnyit. Nem lenne itt helyünk, és nem is kívánjuk a továbbiakban az erjedés témát és ismert kapcsolódásait monografálni, hanem csak alapjaiban annyiban ismertetni, ami a bakteriális aroma-, illat- és ízgerjesztés vonatkozásaiban szükséges.

A francia *Louis Pasteur*-t tekintik a fermentáció felismerőjének, felfedezőjének, aki 1856-ban azt az élesztőgombákkal kapcsolta össze. *Pasteur* a fermentálást „*levegő nélküli lélegzésnek*” nevezte. Mai definícióval: élelmiszerek fermentálása szénhidrátok átalakulása alkohollá, széndioxiddá, vagy szerves savakká gombák (élesztő) és baktériumok, vagy mindkettő hatására anaerob körülmények között. Vonatkozik ez cukrok etilalkohollá alakulására is.

Ugyancsak nagyon röviden felsorolnánk a leggyakoribb erjedések fajtáit [15]:

- Alkoholos erjedés:  $C_6H_{12}O_6 = 2C_2H_5OH + 2CO_2$
- Tejsavas erjedés:  $C_6H_{12}O_6 = 2C_3H_7O_3$
- Ecetsavas erjedés:  $CH_3CH_2OH = CH_3COOH + H_2O$
- Vajsavas erjedés:  $C_6H_{12}O_6 = C_3H_7COOH + 2CO_2 + 2H_2$

1897-ben a német *Eduard Büchner* felfedezte, hogy cukrok fermentálódhatnak olyan keverékekben is, amikben nincsenek élő élesztőgombák és amikben egy általa „*zimáz*”-nak nevezett élesztő-váladék fermentál. *Büchnert* 1907-ben a sejtnélküli fermentálás felfedezéséért Nobel-díjjal tüntették ki [17]. A történelem folyamán maga az élelmiszerek bakteriális erjesztése (fermentálás) külsőleg felügyelt és ellenőrzött folyamat volt, amiben szándékosan, vagy akaratlanul vezérelték, irányították a mikrobiális közösségeket közvetlen, vagy közvetett beavatkozásokkal, értve ezalatt környezeti hatásokat (hőmérséklet, páratartalom, fény, sótartalom, nedvességellenőrzés, stb.) is. Azonban a fermentálás mindig kézműves folyamat volt, amiben a kezelési gyakorlatot *empirikus* próbálkozások sora és tapasztalata alakította ki. Ezekben maga a folyamat és a termék(ek) számos fizikokémiai változáson mennek át, amik a mikroorganizmusok növekedését és egymás mellett élését segítik elő, lehetővé téve a helyi földrajzi környezetben lévő mikrobák általi betelepülését, illetve esetleges részvételét.

### Starterek

Starternek olyan mikrobiális együttest (preparátumot) nevezhetünk, ami legalább egy mikroorganizmus megfelelő nagyszámú sejtjéből áll és amit valamilyen növényi, állati, illetve étkezési nyersanyaghoz adnak annak fermentálásának gyorsítása és irányítása érdekében. Például a tejsav baktériumok csoportjának központi szerepe van a tejtermékek és italok erjesztésében azáltal, hogy szerves savakat, főleg tejsavat termelnek. Jelentősek, mint láttuk ecetsav, etanol, aromavegyületek, bakterocinek, exopoliszaharidek és többféle enzim termeléséért. A 2. táblázat példákat mutat néhány starter-kultúráról [16]. A fentiek csak szemléltetésként kerültek említésre a starterekre, természetesen más erjedésfajtáknál számos más starter is alkalmazásra kerülhet.

### Mikrobiális ízgerjesztés háttere és kémiai vonatkozásai

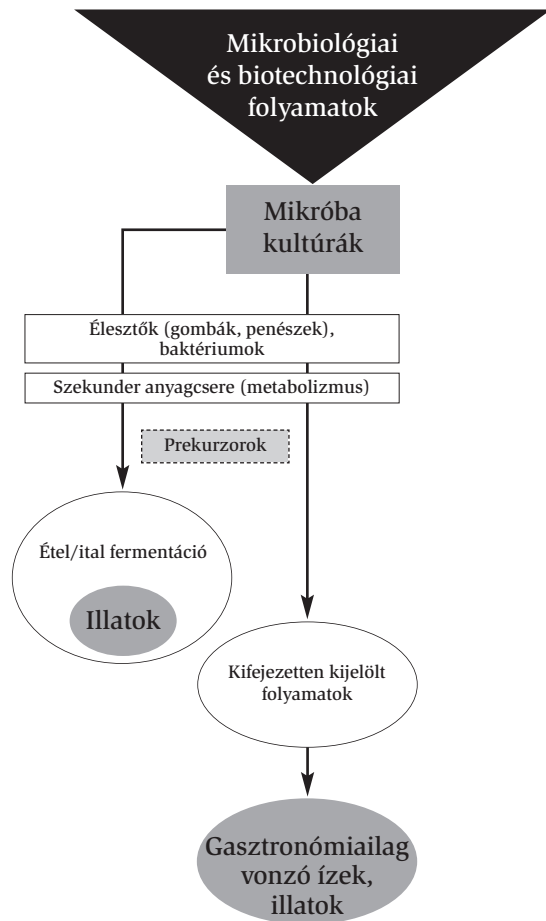
Mikroorganizmusok az íz-, illat- és aroma gerjesztését szekunder anyagcseretermékeként (például cukrok, aminosavak) hozták létre, mint az a 2. ábrán látható. Ez a lehetőség kétféleképpen valósítható meg:

- in situ ízgerjesztés, az étel, vagy ital olyan előállítási eljárás részeként (például sajtok, joghurt, sör, bor esetében), ami meghatározza a végtermék organoleptikus jellemzőit,
- specifikusan kialakított mikrobiális kultúrákkal.

Mindkét esetben prekursorok (starterek), vagy közbenső (résztermékek) adandók a baktériumkultúrához annak érdekében, hogy a specifikus íz-, illat-, aromagerjesztés biokémiai szintézisét „elősegítsék” [22]. A fenti mechanizmushoz enzimatis folyamatok is jelentősen hozzájárulnak, de ezekkel helyhiány és témaszűkítés érdekében itt külön nem foglalkozunk.

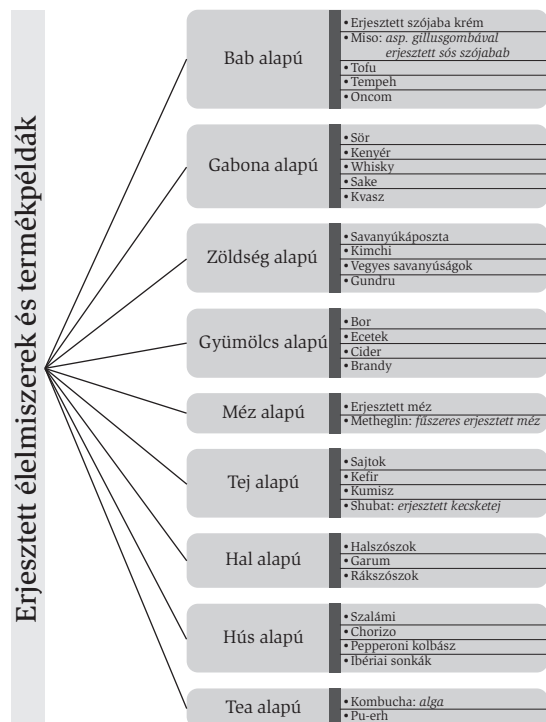
A 3. ábra példákat mutat be arról, hogy csaknem minden emberi alapélelmiszer erjeszthető, és hogy milyen széleskörű az erjesztett termékek köre. Hogy a fermentálás közben az élelmiszerekből, különböző baktériumok által előállított termékekből mi-

## Mikrobiális gasztronómia



2. ábra. Gasztronómiai íz-, illat- és zamatgerjesztés (szintézis) szekunder (másodlagos) metabolitokként mikrobiális erjesztéssel [22]

3. ábra. Erjeszthető és erjesztett élelmiszerek és termékpéldák [21]



Szubsztrátum (élelmiszer)	Baktérium	Termék
Félkemény kukorica	<i>Pediococcus pentosaceus</i> <i>Lactobacillus acidophilus</i>	Vaj íz
Cassava (manioka) bagasse	<i>Kluyveromyces marxianus</i>	Gyümölcsös íz
Előzselatinizált rizs	<i>Neurospora sp.</i>	Gyümölcsös íz
Miszó	<i>Zygosacharomices rouxii</i>	Egyedi íz
Tőzegáfonya törköly	<i>Lentinus edodes</i>	$\beta$ -glucoridáz
Oliva és cukornád bagasse	<i>Rhizopus rhizopodiformis</i> <i>Rhizomucor pusillus</i>	Lipáz
Kókuszolaj sütemény	<i>Candida rugosa</i>	Lipáz
Szójasütemény	<i>Penicillium siplicissimum</i>	Lipáz
Szójasütemény	<i>Bacillus subtilis</i>	Proteáz

3. táblázat. Mikrobiális élelmiszer-erjesztéses íz-, illat- és aromagerjesztés [22]

Vegyületek	Szintetizáló mikrobák, gombák, penészek
Diacetilek	<i>Lactococcus lactis</i> ; <i>Lactobacillus sp.</i> ; <i>Lenconontoc mizenteroides</i> ; <i>Streptococcus lactis</i> ; <i>S. cremoris</i> ; <i>S. diacetylactis</i>
Laktonok	<i>Trichoderma viridae</i> ; <i>Tyromyces sambucus</i> ; <i>Cladosporium snavoleas</i> ; <i>Candida tropicalis</i> ; <i>Tarrovia lipotyca</i>
Eszterek	<i>Hanseinaspora guilliermondi</i> ; <i>Pichia anomala</i> ; <i>Lactococcus lactis</i>
Pirazinok	<i>Corynebacterium glutamicum</i>
Terpenek	<i>Ceratocystis variopora</i> ; <i>Ceratocystis moniliformis</i>
Alkoholok	<i>Hanzenula anomala</i> ; <i>Kluyveramices marxianus</i> ; <i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Vanilin	<i>Pseunomonas petida</i> ; <i>Aspergillus niger</i> ; <i>Corynebacterium glutamicum</i> ; <i>Arthrobacter globiformis</i> ; <i>Serratia marcescens</i>
Benzaldehid	<i>Trametes suareolens</i> ; <i>Pseudomonas putida</i> ; <i>Poyporus tuberaster</i> ; <i>Pjerkandera adusta</i> ; <i>Phanerochacte chrysosporium</i>
Metilketon	<i>Agaricus biosporus</i> ; <i>Aspergillus niger</i> ; <i>Penicillium roqueforte</i> ; <i>Trichoderma viridae</i>

4. táblázat. Mikrobiálisan szintetizált vegyületek

Ilyen ízeket hoznak létre miközben vegyületeket bioszintetizálnak, az néhány példán a 3. és 4. táblázatokban látható. Persze ebben elővegyületek (prekurzorok) is jelentős szerepet játszanak.

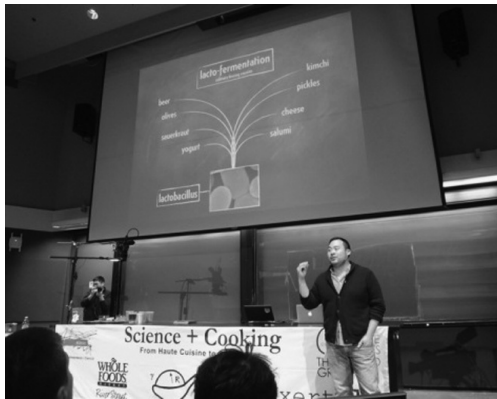
## Új utak, irányok és próbálkozások a gasztronómiai célú mikrobiális erjedéskutatásban

A világban folyó erjesztéses, erjesztési és ízgerjesztési kutatások sokfelé és számos irányban folynak, ezek mindegyikéről itt beszámolni sem helyünk, sem indítékunk nem lenne. Ezért ezekből két olyan erjedéskutatási témát választottunk, amit egyrészt a legérdekesebbeknek és leg-sokatígérőbbeknek tartottunk, másrészt azért, mert bizonyos formában kötődnek a világ legjobbjának elismert *Harvard* egyetemhez, illetve az ott is folyó erjesztési kutatásokhoz.

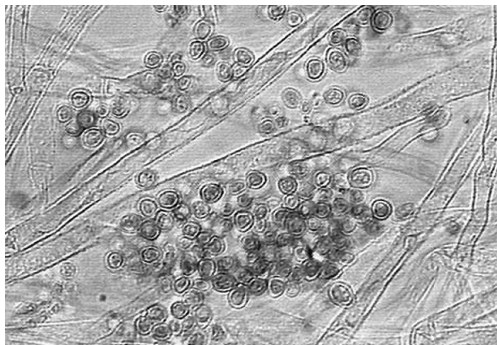




4. ábra. A koreai eredetű kimcsi, erjesztett csípős kínai kelkáposzta [40-42]



5. ábra. David Chang séf és étteremtulajdonos előad a bakteriális fermentációkutatás új irányairól és eredményeiről az Egyesült Államok-beli, a világ legjobb egyetemeként elismert Harvardon [18]



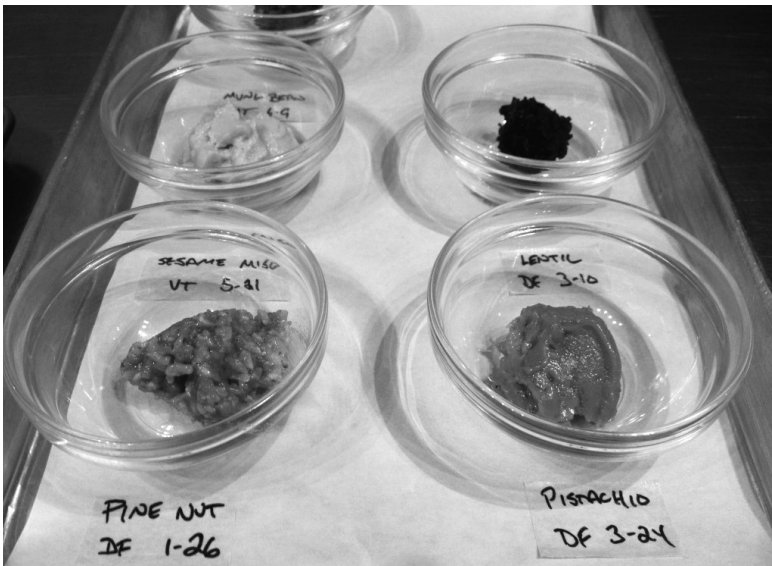
7. ábra. Koji, (*aspergillus oryzae*) erjesztőgomba [30]

## Éttermi séffel együttműködő erjedéskutatás a Harvard egyetemen

Az elsőként ismertetett erjedéskutatási témánál érdekességként kell említést tennünk arról, hogy korunk étkezési mindennapjaiban milyen szorosan fonódik össze a gasztronómia konyhai, vagy éttermi tapasztalata és a tudományos kutatási gyakorlat. Több előző dolgozatunkban említést tettünk kutató tudósokként és amatőr konyhai séfekként a magyar-angol *Kürti Miklós*-ról és a francia *Hervé This*-ról [3], illetve az angol *Heston Blumenthal* [4] angol étterem-séfről és amatőr gasztronómiakutatóról. Ezt a törekvést folytatva itt megemlítjük az egyesült-államokbeli, kínai származású *David Chang* [18] nevét, aki a New York Manhattan városrészbéli *Momofuku* nevű három Michelin-csillagos étterem séfje és tulajdonosa, amatőr erjedéskutató, valamint az új ízhatású erjedési gasztronómiai termékeket előállító *Kaizen Trading Company* [19] kutató, gyártó és forgalmazó cég tulajdonosa [20]. Jelen szerzőt ennek az erjesztéskutatási témának külön ismertetésére az is motiválta, hogy az 1. táblázatban vázolt ázsiai erjesztett gasztronómiai termékek jelentős terjedése figyelhető meg a világban. Erre csak egyetlen példa a sok helyen, így Magyarországon is forgalmazott koreai csípős erjesztett kínai kelkáposzta, a kimcsi (4. ábra). Több száz fajtája létezik, és más ételek alapjait is képezheti.

Az erjedéskutatási téma érdekességét, fontosságát és jelentőségét sok pragmatikus és más érv mellett hangsúlyozottan kiemeli és érdekességként jellemzi az a tény, hogy a *Momofuku team* a világ legjobb egyetemével, a Harvarddal működik együtt erjesztéskutatási témákban és eredményeiről a Harvardon beszámolhatott *David Chang* (5. ábra) és ott elismerésre lelt egy, a tudományos rangkorságok világában a semmilyen tudományos címmel nem rendelkező szakács (séf). *Chang* a Harvard egyetemmel együttműködve, fentebb említett cége keretében találta fel, gyártja és forgalmazza a *Hozon* [23] és *Bonji* [24] nevű új ízhatású erjedési termékeket. A koreai nyelvből származó és „befőttet” jelentő márkanév (trade mark) a *Hozon* krém előállítását primer prekursorokból (mint kesudió, csicseriborsó, vagy lencse-magok) (6. ábra), só, egy japán néven *koji* nevű (*aspergillus oryzae*) (7. ábra) [26] gombás erjesztéssel állítják elő. A *Hozont* a gasztronómiában ízes vajpótlóként, illetve curry krém, vagy levesalapként forgalmazzák és használják [27]. A *Bonji* (8. ábra), ami koreai nyelven „lényegét”, vagy „esszenciát”

6. ábra. Különböző magok (prekursorok) erjesztésével (fenyőmag, pisztácia, szezámmag, aranybab) előállított *Hozon* krémek [30]





## Mikrobiális gasztronómia

jelent, a *Hozon*-hoz hasonló komponensekből ellenőrzött idejű erjesztéssel, majd a keverék kipréslésével készült folyadék. *Chang* szerint a magaszterű gasztronómiai „game changers” (játékújtóknak), a legnagyobb kihívás „convincing people to eat bacteria and mould may be the biggest challenge yet” (az embereket meggyőzni, hogy baktériumokat és penészeket fogyasztanak).

A *Hozon* a Japánban, de onnan az utóbbi fél évszázad alatt az egész világra kiterjesztett, így például Magyarországon is forgalmazott ázsiai, illetve japán eredetű, *Miszó* nevű, szójababból, árpából, rizsből, aspergillus orizae-val erjesztett közismert krém gasztronómiai termékhez [28], illetve a *Miszó*-termékek családjához sorolható (l. 1. táblázat). A *Bonji*t hasonlóan a már ismert, de szintén ázsiai eredetű szójaszószokhoz hasonlóan világszerte fűszerként, pácanyagként és ízesítőként használják. A *Hozon*-nak és a *Bonjinak* gasztronómiai szempontból, feltalálói szerint a *Miszónál* és a közismert szójaszósznál még vonzóbb új ízei vannak.

### Terroir, avagy a bakteriális hely szelleme

A *terroir* egy, a bakteriális erjesztéskutatásban még aránylag újkéltű fogalom [29]. Francia jövevényszó és fonetikusan *terodr*-ként ejtik az angol nyelvben is. Magyarosítása nem ismeretes, ezért itt is a francia-angol kifejezést használjuk. A *terroir* a francia *terre*, angolul *land*, (föld, terület, talaj) szóból származik és lényegében egy hely olyan környezeti, földrajzi, geológiai és éghajlati, valamint bakteriális karakterisztikumait jelenti, amik hozzájárulnak az élelmiszerek, táplálékok egyedi helyi jellegéhez. Átvitt értelemben a „hely bakteriális szellemének” (*genius loci*) is tekinthető. Bevezetése eredetileg a borászatban, illetve a borászati erjesztésben történt és azon a feltételezésen alapszik, miszerint, mint említettük, a hely és a talaj, ahol és amiben a szőlő termett, és az ott jelenlévő baktériumok és gombák (penészek) unikális, egyedi gasztronómiai ízjellemzőket, bukét, minőséget adnak a boroknak.

*Chang* és társai a *Harvard egyetem Center for Systems Biology*-ban a *terroir* fogalmát kiszélesítve arra is alapozzák, hogy a talaj és más fentemlített jellemzők hatásukat nemcsak a borokra nyomják rá, hanem más erjesztési termékekre is, a mindenütt jelenlévő helyi, lokális baktériumok és gombák révén. A *Miszo*, *Hozon*, *Bonji* esetében a prekursorokat *Chang* és társai, mint említettük, a közismert *Koji*-val (*aspergillus orizae*-val) erjesztették, de az erjesztés helyén (New York) szerintük a levegőben ott voltak a „hely mikrobiális szellemének” megfelelő mikrobák és gombák is. A folyamatot valahogy úgy kell elképzelnünk, mint ahogyan e dolgozat elején a mikrobiális erjesztést már általánosságban vázoltuk, de itt *Chang*ék vizsgálataihoz és az ott jelentkező mikrobiális *terroir* tekintetbe vételével specifikusabban megismételjük. Az elszaporodó *aspergillus gombák* és a mikrobiológiailag ott jelenlévő New York *Manhattan városrészi terroir* baktériumok és gombák az erjesztés során a prekursorokból (növénymagok molekuláiból) táplálkoznak, majd váladékot (új molekulákat) termelnek. A váladék egy, vagy több, a *terroir*-ban jelenlévő baktériumkultúrának tud kedvezni, ami hatására egy, vagy több új mikroorganizmus telepedik ott le és szaporodik el, újabb és újabb ízmolekulákat termelve, majd így folytatódik tovább a hosszabb-rövidebb láncolat, amíg ki nem alakul egy *Manhattan városrészi* jellemző (l. 30., *The Misofiation of Mahattan*) végső domináns íz-, illat-, aromaegyüttes az erjesztett termékben (például *Hozon*, *Bonji*, *Miszó*).



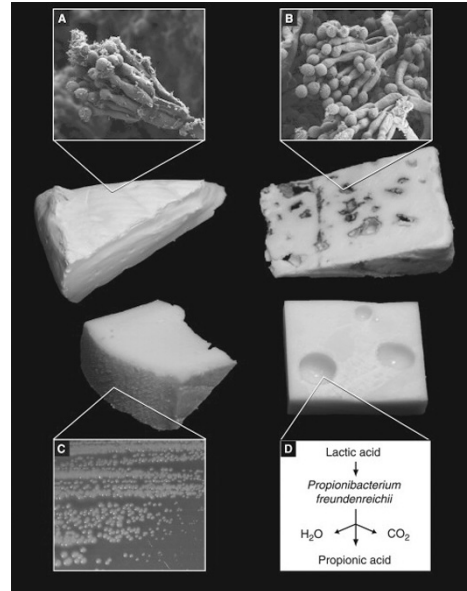
8. ábra. David Chang cége, a Kaizen Trade Company által gyártott és forgalmazott Bonji ételízesítő [25]

### Bakteriális ökológia és a gasztronómiai, ingyenc sajtok, mint a bakteriális közösségi erjesztéskutatás modelljei

A következőkben ismertetésre kerülő, a Harvard egyetemen jelenleg is folyó erjedéskutatási témánál visszatérnénk a már az előzőekben említett mikrobiális ökológiára. Míg a mikrobákat, mint láttuk, már a tizenhetedik század óta felfedezték és tanulmányozták, főleg egyedi baktériumokra vonatkozó laboratóriumi vizsgálatokban [31]. A valóságban azonban a mikrobák általában nem individuumként léteznek, működnek a természetben, hanem komplex sokspéciesz közösségekként. A mikrobák ökológiája tehát azok egymásközi, valamint a környezetükkel való kapcsolatrendszerre vonatkozik. Ez elvileg korszerű laboratóriumi módszerekkel vizsgálható lehetne. A mikrobák genomjának DNS-szekvenálási fejlődése jelentős mennyiségű információhoz segített a környezeti mikrobák DNS-szekvenciáiról. Sajnos a mikroorganizmusok egymással való kapcsolatrendszerének részletes tanulmányozása nehézségekbe ütközik, mert általában maguk a baktériumközösségek reprodukálhatóan nem tenyésztethetők exakt laboratóriumi körülmények között. Ezért részletes vizsgálatok nélkül a mikrobaközösségek szerepe és a genomjaikban kódolt működése a közelmúltig homályban maradt. A baktériumsejtek élete együttes molekuláris, biokémiai és mikrobiológiai alapjának felderítésében nagyon kevés tudható arról, hogy a baktériumközösségek hogyan működnek a valós, nem laboratóriumi környezetben. Ez a kérdés kísérletileg olyan erjesztett élelmiszertípusban jelen lévő mikrobiális ökorendszerek megtalálá-



9. ábra. Példák sajtváltozatokra [32]



10. ábra. Baktériumok és gombák habitatja (élőhelye) sajtokban és sajtokon [32]  
 A: gombák, B: penészek,  
 C: baktériumok, D: vegyületek

sával, illetve tanulmányozásával, vizsgálatával oldható csak meg, amelyek a mikrobák egymás közti, a gombákkal együtti komplex közösségi *modellként* működhetnek és egyidőben lehetőséget nyújthatnak részletes genetikai elemzésekre is. A mikrobiális és a gombák erejedésekor ökológiailag kialakult mikroba-gomba együttes egyik ilyen legékezzsúlyosabb *modelljét* a sajtok szolgáltatják. A világon létező sokszáz sajtfajta (9. ábra) íz, aroma, illat, zamat, szín és textúra sokfélesége és földrajzi változatossága [33] közvetlenül szolgáltatja az ezekben s ezeken növekedő mikroba-gomba sejtközösségek tanulmányozásának lehetőségét. A sajtok diverzitásának bizonyítására nem tudjuk, de nem is kívánjuk itt kihagyni a néhai *de Gaulle* tábornok, francia elnök e kérdéshez kapcsolódó híres mondását: „... can you govern a country which has two hundred and forty-six varieties of cheese?” (lehet kormányozni egy olyan országot, amelynek kétszáznegyvenhat sajtfélesége van?) [34] Meg kell még említeni, hogy a sajtok olyan unikális környezetet képviselnek, amiben a mikrobiális közösségek együttélésének, kölcsönhatásának a tanulmányozása jelentősen leegyszerűsödik. A sajtok a mikrobák és gombák különböző fajtáinak két, egymástól különböző *habitatját* (élőhelyét) képezik. Az első a sajtok belsejében található és főleg tejsavat és baktériumokat tartalmaz, a második azok felületén, ahol a mikrobák és gombák változatos együttese képezi a sajtok héját (10. ábra). Mindkét élőhelyen a mikroba-gomba közösségek együttese jelentősebben egyszerűbb, és ezáltal egyszerűbben is vizsgálható, mint bármilyen, a földön található más komplex mikroba-gomba *habitatban* (élőhelyén). A sajtokat mikroba közösségekkel való erjesztéssel több ezer éve tenyésztik és tenyésztésük *empirikus* ismereteit a sajt-előállítók, gyártók nemzedékei adták át egymásnak.

A sajtkészítés általában több fázisból áll. Az elsőben a tejet a tejfehérje koagulálása révén szilárd túróvá és folyékony savóvá alakítják. Ezt a koagulálást két adalékos módszerrel végzik: savanyítással és proteolízissel. A savanyítás akkor történik, amikor a tejsavbaktériumok tejsav képzés érdekében erjesztik a laktóz diszaharidot. Régebben a sajtkészítők a tejben előforduló természetes tejsavra bízta az erjesztést, de manapság a folyamatot szabványosították, úgynevezett domesztikált (házasított) *Lactococcus lactis*, *Streptococcus thermophilus* és *Lactobacillus sp.* starter mikrobakultúrák hozzáadásával. Ezen baktériumok által előállított sav a kazeint koagulálja. A sajtkészítés második fázisában a kazeint és tejsírt tartalmazó túró elválasztják a savótól. A sajt típusától függően a túró hőkezelik, sózzák, préselik és/vagy különböző méretű és formájú kerekékké formázzák. A sajtok ebben a fázisban frissen is fogyaszthatók, de általában a sajtkerekéket különböző időtartamokig érni (öregedni) hagyják hűvös, nyirkos, vagy száraz helyen. Tulajdonképpen ebben az érési fázisban alakulnak ki igazán a friss sajtokból a kismillió íz, illatot, aromát, zamatot, színt és textúrát bemutató érett sajtok. Az érési folyamat szerves részeként a starter kultúrák és a nem-starter tejsavbaktériumok a sajt belsejében tovább növekednek és metabolizálódnak, míg a sajt felületén baktériumok és gombák (penészek) sokkomponensű biofilmet, azaz héjat képeznek (11. ábra). A tejsavas és bakteriális starter kultúrák mellett különböző fajtájú baktériumok és gombák, penészek is adagolhatók eredetileg a sajtkészítés folyamata során a jellegzetes ízek, illatok, aromák és zamatok kialakításához. Így készülnek például a külső hamvas és penészes héjú fehér *Camembert*, vagy *Brie* sajtok a *Penicillium camemberti*, vagy *P. candidum* hozzáadásával [35]. A sajtok felületén (sajthéjon) képződött biofilmek (11. ábra) a már előzőleg említett modelltulajdonságokkal és követelményekkel rendelkeznek.

A fenti kérdésről a Harvard egyetemről nemrég publikált közlemények [37, 38] az Egyesült Államokban és Európában előállított 137 (!) féle sajtban tanulmányozták a mikrobiális *terroir* kérdését a DNS szekvenálásának nagyátersztésű (high throughput), úgynevezett *next generation high sequencing* (újgenerációs nagymértékű DNS-szekvenálás) módszerével [39]. Ez a baktériumok

## Mikrobiális gasztronómia

és gombák úgynevezett *génusz* szintjéig tette lehetővé a sajthéj-közösségek azonosítását. Az **5. táblázat** a nemzeti hovatartozást mutatja (a földrajzi azonosításhoz l. [37]).

Mind a baktériumok, mint a gombák esetében nagy a hajlam a közösségi kölcsönhatásra. A sajthéjak mikrobiális és gombás változatosságát tekintve elmondható, hogy a különböző földrajzi régiók a szekvenálási vizsgálatok szerint nem rendelkeznek unikális mikrobiális közösségekkel, azaz nagyon hasonló összetételűek, ugyanazokat a baktérium- és gombatípusokat tartalmazzák. Ennek a fordítottja is kiderült, miszerint egyedi sajtkészítők különböző sajtokat állíthatnak elő nagyon különböző mikrobiális és gombaközösségekkel. Meglepő módon ez azt jelenti, hogy a fentebb említett mikrobiális *terroir* néha kevésbé befolyásolja a sajthéjak diverzitását, mint például a sajtkészítés környezete. Más szóval döntő a héj mosása, vagy a héj beoltása gombákkal a sajtkészítéskor. Így alakítják ki például a hamvas héjakat.

A sajtkészítés földrajzi helye és a mikrobiális közösségek közötti kapcsolat a „*ha valahogy tervezed, az majd valahogy ki is alakul*” empiria elfogadásával jár, azaz igazán nem mindig a *készítés földrajzi helye* a döntő, hanem az, hogy *hogyan* készítik, illetve kezelik a sajtokat. Ha például egy wisconsinai, egy franciaországi és egy kaliforniai sajtkészítő hasonló típusú sajt nál körülbelül hasonló körülményeket, mint például hőmérséklet, nedvesség és öregbítési (érlelési) időt hoz létre, nagy valószínűséggel sajtaikban és sajthéjaikon ugyanazok a mikrobiális közösségek és ízek, illatok, aromák és zamatok alakulhatnak ki.

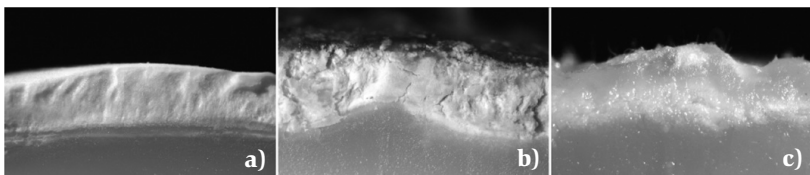
Említett szerzők [37] hangsúlyozzák, hogy a földrajz és az összetétel közötti kapcsolat nem feltétlenül azoknak a starter mikroba diverzitásoknak tulajdonítható, amikkel a sajtkészítés technikai folyamatánál a rendszert kezelik. Annál is inkább, mert találtak olyan nyers tejből készült sajtokat, amikbe nem, vagy nagyon kevés starter kultúrát tettek, de a termék hasonló összetételűnek bizonyult a világ különböző részeiben.

A szerzők azt is kiemelik, hogy a fent említett vizsgálatok nem igazolták a mikrobiális *terroir* létét számos sajtfeleségben. Azért nem, mert, mint a **12. ábrán** látható, az eddigi vizsgálatok a mikrobák és gombák kapcsolatát, egymásra hatását csak a *génusz* szintjén vizsgálták a mikrobiális diverzitást. Ugyanis előző elemzések [40] kimutatták, hogy jelentős változatosságok fordulhatnak elő a mikrobák és gombák *fajtainak* és *törzseinek* szintjén is, amik például egyedi gasztronómiai tulajdonságokat válthatnak ki a vizsgált sajtoknál.

A sajtkészítők közötti földrajzi távolság és a sajthéj összetétele közötti korreláció hiánya azt sem jelenti, hogy ennek ellenére egyedi sajtkészítők nem fej-

Sajttípus	Származási ország	Darab (összesen)
Természetes	USA	21
	Svájc	1
	Spanyolország	3
	Anglia	6
	Írország	0
	Franciaország	10
	Olaszország	9
	Portugália	0
	Németország	0
	Svédország	1
		<b>51</b>
Mosott	USA	23
	Svájc	8
	Spanyolország	2
	Anglia	4
	Írország	2
	Franciaország	16
	Olaszország	4
	Portugália	1
	Németország	1
	Svédország	0
		<b>61</b>
Hamvas	USA	6
	Svájc	1
	Spanyolország	0
	Anglia	4
	Írország	0
	Franciaország	12
	Olaszország	2
	Portugália	0
	Németország	0
	Svédország	0
		<b>25</b>

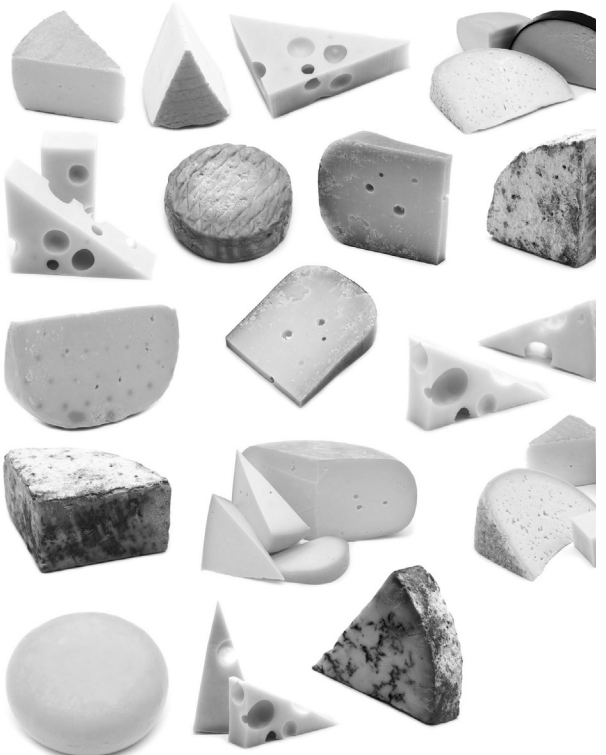
**5. táblázat.** A Harvardon vizsgált sajtok típusa és nemzeti eredete



**11. ábra.** Sajtokon kialakuló baktérium biofilm héjak [36]  
A: hamvas héj; B: természetes héj; C: mosott héj



**12. ábra.** Sajthéjak mikroba és gomba közösségek összetétele [38]





## Mikrobiális gasztronómia

leszhetnek sajtaikban unikális mikrobákat, és ezáltal mikrobiális erjesztésű új íz, illat, aroma, zamat, szín és textúrájú sajtokat. Bizonyos földrajzi régiókban egyes sajtkészítőknek hasonló stílusú, de különböző összetételű és gasztronómiai jellemzőjű sajtaik is lehetnek.

### A mikrobiális gasztronómia jövője és következtetések

A mikrobiális erjesztés és az erjesztett gasztronómiai termékek széles elterjedését és földrajzi változatosságát tekintve valószínűnek látszik e termékek jelentős mértékű globalizálása. Erre példának tekinthető az ázsiai erjesztési termékek (kimcsi, miszó, szójaszós) európai és amerikai megjelenése az utóbbi fél évszázad során. Az erjesztés kémiai, molekuláris és biokémiai mechanizmusa főbb vonalaiban már tisztázottnak tekinthető, de ugyanaz még manapság sem mondható el annak mikrobiológiai és ökológiai vonatkozásában. Mint láthattuk, a *terroir* fogalmának a bevezetése és annak a baktériumok és gombák egymásra hatására vonatkozó kapcsolatai érdekes eredményeket hoztak, és számos új gasztronómiai lehetőségre adnak reményt, és el kell ismernünk, hogy ebben a vonatkozásban a kutatás még aránylag az elején tart, de kilátás van arra, hogy az aránylag közeljövő jelentős áttöréseket hoz. Még egy utolsó szót a *terroir* jelenség jelentékenységről és a hozzá fűzött reményekről, amikről a tekintélyes *New York Times* 2013-ban „*Vive le Terroir*” címmel közölt cikket [43].

#### IRODALOM

- [1] [https://www.academia.edu/171283/The\\_Evolution\\_of\\_Gastronomy](https://www.academia.edu/171283/The_Evolution_of_Gastronomy)
- [2] J. A. Brillat-Savarin, Az ízlés fiziológiája, Singer és Wolfner, Budapest, 1912
- [3] Braun Tibor, Empíriától a tudományig. Molekuláris és szupramolekuláris gasztronómia. Magy. Kém. Foly., (2011) 64, 114.
- [4] Braun Tibor, Gasztronómiai íz-, illat- és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei, Magy. Kém. Foly., (2014) 69, 347.
- [5] Braun Tibor, Gasztrómazochizmus. A chilipaprika-kémia, a Scoville-skála és az ízcsipősségi világrangsor, Magy. Kém. Foly., (2015) 70, 85.
- [6] <https://nicolatriscott.files.wordpress.com/2013/03/gastronomy1.jpg?w=300&h=225>
- [7] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Bakt%C3%A9riumok>
- [8] Paul De Kruif, Bacillusvadászok, Könyvbarátok Szövetsége Kiadványa, Budapest, 1940.
- [9] Karinty Frigyes, Bacillusok és bogarak, Pesti Napló, (1931) január 4, 42.
- [10] <http://en.wikipedia.org/wiki/Erjed%C3%A9s>
- [11] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Probiotikum>
- [12] Paul Vonnegut Jr., A bajnokok reggelije, Maecenas, 1988.
- [13] <http://www.wolframalpha.com.iri=number+of+stars+in+the+observable+universe>
- [14] <http://www.isme-microbes.org/whatis>
- [15] <http://chemonet.hu/hun/teazo/erjedes/erjedes.html>
- [16] S. Hati, S. Mandal, J. B. Prajapati, Novel Starters for Value Added Fermented Dairy Products, Curr. Res. Nutr. Food Sci., (2013) 1, 83.
- [17] Pap József Sándor, Vegyészkalendárium, Eduard Büchner. Egy tökéletesen hétköznapi kémikus, Magy.Kém.Lapja, (2015). 70, 171.
- [18] <https://awesomesauceats.files.wordpress.com/2012/11/dsc00707.jpg?w=500&h=374>
- [19] <http://www.eater.com/2014/3/20/6258145/momofukus-kaizen-trading-company-up-fermenting>
- [20] <http://www.eater.com/2013/11/19/6327597/david-changs-harvard-lecture-fermentation-is-a-cultural-universal>
- [21] [http://en.wikipedia.org/wiki/Fermentation\\_in\\_food\\_processing](http://en.wikipedia.org/wiki/Fermentation_in_food_processing)
- [22] M. A. Longo, M. A. Sanromán: Production of Food Aroma Compounds Microbial and Enzymatic Methodologies, Food Technol.Biotechnol., (2006) 44, 335.
- [23] <http://en.wikipedia.org/wiki/Hozon>
- [24] <http://en.wikipedia.org/wiki/Bonji>
- [25] [https://www.americastestkitchenfeed.com/wp-content/uploads/2014/03/DSC\\_0029\\_1.jpg](https://www.americastestkitchenfeed.com/wp-content/uploads/2014/03/DSC_0029_1.jpg)
- [26] [http://en.wikipedia.org/wiki/Aspergillus\\_orizae](http://en.wikipedia.org/wiki/Aspergillus_orizae)
- [27] <http://www.newyorker.com/magazine/2013/01/21/the-umami-project>
- [28] <http://en.wikipedia.org/wiki/Miszo>
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/Terroir>
- [30] <http://www.ediblegeography.com/the-misofication-of-manhattan/>
- [31] [http://en.wikipedia.org/wiki/Microbial\\_ecology](http://en.wikipedia.org/wiki/Microbial_ecology)
- [32] <http://www.smithsonianmag.com/smart-news/microbes-give-cheese-all-over-world-its-deliciousness-are-surprisingly-universal-180952231/?no-ist>
- [33] [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_cheeses](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_cheeses)
- [34] [http://en.wikipedia.org/wiki/Charles\\_de\\_Gaulle](http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_de_Gaulle)
- [35] P. Kindstedt, Cheese and Culture: A History of Cheese and its place in Western Civilization, Chelsea Green Publishers, 2012.
- [36] <http://microbialfoods.org/science-digested-cheese-survey/>
- [37] B. E. Wolfe, R. J. Dutton, Fermented Foods as Experimentally Tractable Microbial Ecosystems, Cell, 161 (2015) 49.
- [38] B. E. Wolfe, R. J. Dutton, Towards an Ecosystem Approach to Cheese Microbiology, Microbiol. Spec., (2013), 1, 1.
- [39] [http://en.wikibooks.org/wiki/Next\\_Generation\\_Sequencing\\_\(NQS\)](http://en.wikibooks.org/wiki/Next_Generation_Sequencing_(NQS))
- [40] [http://www.bejap.com/wp-content/uploads/2014/06/IMG\\_2832.jpg](http://www.bejap.com/wp-content/uploads/2014/06/IMG_2832.jpg)
- [41] [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQTBCIN4o2DY0q09i9oQrcXyDUvqQpPC0s0xTM7\\_t4nf698vQGW](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQTBCIN4o2DY0q09i9oQrcXyDUvqQpPC0s0xTM7_t4nf698vQGW)
- [42] [https://limdongcheol.files.wordpress.com/2011/02/267\\_28039\\_friendseat\\_kimchi.jpg](https://limdongcheol.files.wordpress.com/2011/02/267_28039_friendseat_kimchi.jpg)
- [43] [http://www.nytimes.com/2013/09/01/sunday-review/vive-le-terroir.html?\\_n=o&\\_r=0](http://www.nytimes.com/2013/09/01/sunday-review/vive-le-terroir.html?_n=o&_r=0)

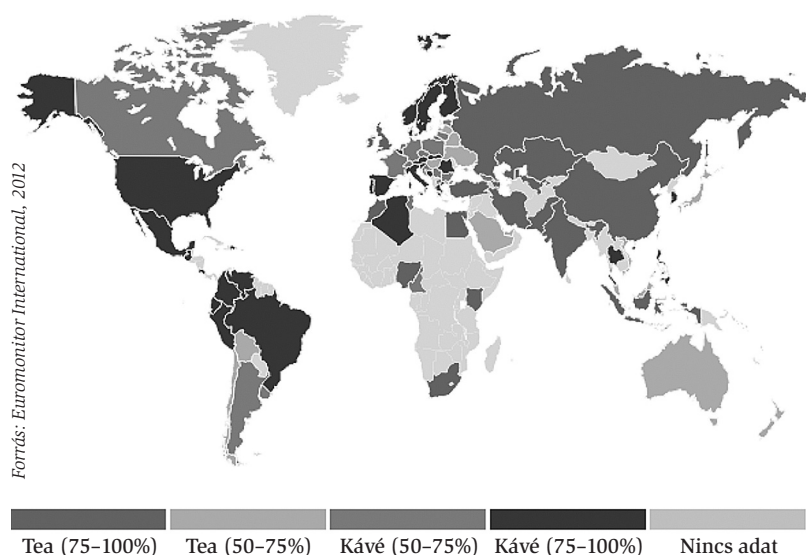


# Viharfelhők a világ kávétermelése és kávéital-fogyasztása felett

## Elhárítási remények biokémiai-mikrobiológiai kutatással

### Előszó

Itt eltekintünk a kávénövény, a kávébab, ezek termesztése és termelése ilyenkor szokásos bemutatásától, ismertetésétől, hiszen e kérdésekről hatalmas, könnyen hozzáférhető szakirodalom áll rendelkezésre nyomtatott és elektronikus változatban egyaránt [1, 2]. Ennek, főleg alapszintű gyarapításának nem sok értelmét láttuk. Talán itt azért futólag említést tennénk jelen szerző egy nemrégiben publikált dolgozatáról, ami szintén a kávétermelés és -forgalmazás – mondhatni, bizzar – változatával foglalkozott [3]. Amiről mindezek ellenére érdemes említést tenni a kérdés horderejének bemutatására az, hogy a kávé jelenleg a nyersolaj után a világ második, gazdaságilag legforgalmazottabb árucikke és többségükben szegény országokban körülbelül 10 millió embernek kínál munkát. A kávéforgalmazásból származó globális bevételek manapság a 65 milliárd dollárt is elérik például az 1990-beni 30 milliárddal szemben [4] **(1. ábra)**. A világ kávétermelésének nagy része kávéitalként kerül fogyasztásra, ennek különböző összetételekben előállított változatai **(2. ábra)** a víz után a világ legnépszerűbb italai, ugyanis több mint 500 milliárd csésze kávé fogyasztanak évente a világban. Idéznénk itt Erdős Pál közismert matematikus híres mondását: „*a matematikus olyan készülék, ami a kávé tételekké (tétélekké) változtatja*” [5]. Mindez, mint közismert [9] a kávé hatóanyagának, a koffeinnek tulajdonítható. A koffein (1,3,7-trimetilxanton) az embert éberebbé teszi azáltal, hogy molekulája, egy purin alkaloida, szerkezetileg az adrenalinhoz hasonlít **(3. ábra)** [10]. A koffein bioszintézise xantozinból történik, a xantozin 7-metilxantozin 7-metilxantin-teobromin-koffein útvonalon, ahol az első, a harmadik és negyedik lépéseket az N-metiltranszferázok katalizálják, S-adenozin-1-metiomet (SAM) használva metil donorként [11] **(4. ábra)**. A kávéital hatásához visszatérve, az adrenalin attól függően dúsul fel az agyban, hogy meddig maradunk ébren és az agy receptoraihoz kapcsolódva okozzák azt az álmosító hatást, amit mindannyian érzünk egy hosszú, fárasztó nap után. Ez tulajdonképpen a test jelzése az agy felé arról, hogy túlterhelt és egy időre ki kellene kapcsolnia. Amennyiben a fáradást, bágyadást át szeretnénk hidalni, a koffein (a kávéital, kávéivás) segíthet. Szerkezeti hasonlóságuk folytán a koffein verseng az adenosin receptorokhoz való kötődésért, azonban ezek nem hajtják végre a kikapcsolási jelzést akkor, amikor a koffeinhez kötődtek. Más szóval testünk megkísérli elhalasztani az álmoságot azáltal, hogy a koffein

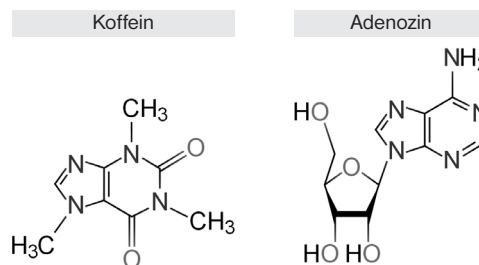


1. ábra. A világ kávé- és tea fogyasztása [6]

Rangsor	Ország	Fogyasztás évi kg/fő
1.	Finnország	12,0
2.	Norvégia	9,6
3.	Dánia	8,9
4.	Hollandia	8,2
5.	Svédország	8,0
6.	Svájc	7,7
7.	Belgium/Luxemburg	7,6
8.	Németország	6,5
9.	Kanada	6,1
10.	Észtország	6,0
11.	Olaszország	5,8
12.	Szlovénia	5,6
13.	Ausztria	5,3
14.	Franciaország	5,3
15.	Brazília	5,2
16.	Görögország	5,1
17.	Costa Rica	4,5
18.	Ciprus	4,4
19.	Spanyolország	4,2
20.	Egyesült Államok	4,1



2. ábra. Példák kávéital-változatokra világszerte [7]



3. ábra. Koffein és adenozin

blokkolja a befogadást. A koffein az adrenalintermelést is megtéveszti, ami megnöveli szívverésünk és légzésünk sebességét és akcióra készíti agyunkat és izmainkat. A kávéitaltól erősítést, frissítést érzünk, mert mint említettük, a koffein blokkolja az ál-mosság jelét és azzal téveszti meg testünket, hogy az támadás alatt áll. És itt még nem beszéltünk a kávéivás élvezeti (gasztro-nómiai) érenyeiről, amik szintén nem elhanyagolható tényezők.

Mint gyógyszerek és kábítószeres esetében, a kávéital-fogyasztásban a koffeinnel szemben is kialakulhat tolerancia úgy, hogy azonos hatásért egyre többre van igénye a szervezetnek. Innen rövid az út, a kávéivás nem csak élvezetté, hanem szenvedéllyé válásáig vagy válhatóságáig [12,13]. Eredményként a fogyasztók annyira megkedvelik a kávéitalt, hogy csökkenése pánikhan-gulatot vált, vagy válthat ki belőlük.

A kávéital terjedésére vonatkozóan érdekességként itt megemlítenénk a kávézás viszontagságos bevezetését Svédországban. Ott a kávé, illetve a kávézást 1674 körül ismerték meg, de körülbelül a 18. évszázadig tartott, amíg divatossá vált a gazdagok kö-rében [14]. Akkor váratlanul, 1746-ban III. Gusztáv királyi rendeletet adott ki „a túlzott, káros és alkalmatlan kávé- és teafogyasz-tás ellen”. Megszegéséért komoly összegű büntetéseket helyeztek kilátásba és országosan elkobozták a kávé- és teáscsészéket. Később a kávéivást teljesen betiltották. Ennek ellenére a fogyasztást titokban folytatták [15]. A tiltást csak 1820-ban oldották fel, ami után a kávéital a domináns élvezeti itallá vált, és mint az 1.b. ábrán látható, Svédország a világ egyik legnagyobb kávéfo-gyasztója lett. A tolerancia vonatkozásában az amerikai FDA (Federation of Drug Administration) például 400 mg koffein na-ponta (4 kávéscsésze főzött kávéital) egészséges felnőtt esetében elfogadható fogyasztásnak tekint, míg 140 csésze kávé-ital-fogyasztás halálos lehet. De halálhoz vezethet egyetlen evőkanál koffeinpor is. A koffein nemcsak az embereket bénítja és mérgezi, hanem a rovarokat is, elfojtva a foszfodieszteráz aktivitást és növelve az intracelluláris ciklikus adenozinmonofoszfát szintjét. A koffein toxicitása kötődik negatív hatásához a DNS javításához és rekombinációjához és ezáltal természetes károkozó, kártevő, illetve rovarirtónak és rovarriasztónak tekinthető azzal a körülbelül 850 féle rovarfajtaival szemben, amik károsítják, vagy károsíthatják a kávénövényt, vagy a kávébabot.

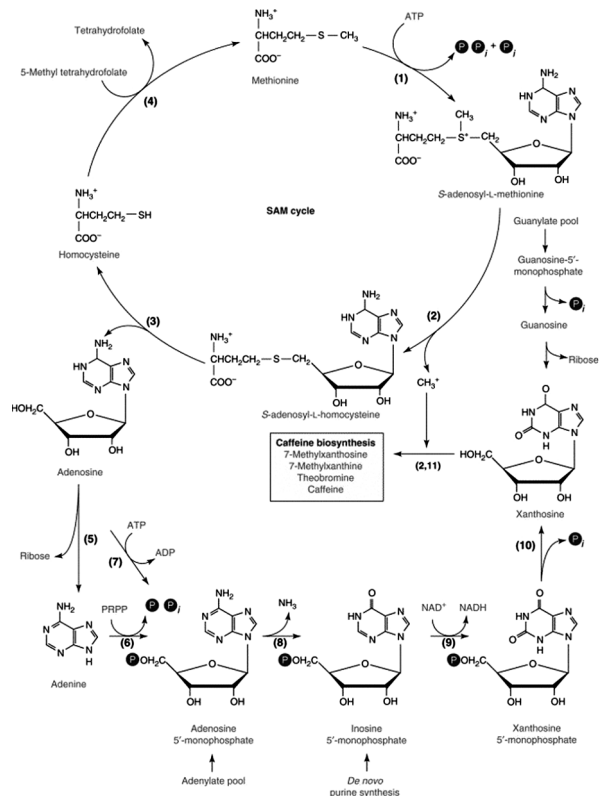
Létezik azonban egy kártevő teremtmény, bogár a földön, ami arányosan számítva, a kávékoffein halálos dózisánál sokkal sokkal többet is elbír károsodás nélkül. Lényegében ez a bogár magát a kávébabba befűrve kávé eszik reggelire, ebédre, va-csorára, és mindenkor ezen idők között. Bármennyire elképesztő, de a kávébogyó-fűróbogár nem eszik (fogyaszt) mást, csak ká-vébabot, benne a koffeint és ebből jól megél a kávébab kárára.

## Bevezetés

A kávéfűró bogár a világ egyik legpusztítóbb kártevője. Ez az apró bogár jelen van a világ minden részén, ahol kávé termeszte-nek és nagy szaporodási kirobbanás esetén tönkretelheti a kávétermés 80 %-át. Ez azt jelenti, hogy az évi károkozás, illetve ká-vébab pusztítás világszerte elérheti az 500 millió dollárt, ezáltal veszélyeztetve körülbelül 20 millió kávétermesztő jövedelmét, illetve bevételét. A kávéfűró bogár (*Hypothenemus hampei*) [16] egy Afrikából származó kis bogár, lárvája fehér, feje fekete, hossza 0,7–2,2 mm, szélessége 0,2–0,6 mm. Erős állkapcsai rágásra alkalmasak és lárvakora 10–26 napig tart. A felnőtt nőstények 1,4–1,8 mm-esek, a hímek kisebbek. A nőstény bogarak rövid távokra repülni képesek, elejükön 6 foguk van, a hímek szárny-nélküliek. Maturálásuk (tojástól felnőttig) időjárásától függően általában 24-től 45 napig tart.

Általában a nőstények a kávébogyót a száránál fűrják át, de a száraz gyümölcsbe oldalról is bele tudják fűrni magukat (5. ábra). Két nappal a bejutás után a bogár 35–50 tojást (petét) rak, ami hímenként 13 nőstényt termel. A nőstények életideje 35–190, a hí-meké 40 nap. Az új rovarok a kávébab belsejében párosodnak. Az idők folyamán a károkozó-elhárítás a kávétermő farmokon rész-ben prevencióval, megelőzéssel, részben kémiai úton történt. A prevenció a kávébabok gondos megvizsgálásából állt a kávé-farmokon és azok elhagyása előtt, ezáltal akadályozva a bogarak terjedését. Több kávétermelő országban ilyen irányú vizsgála-tot is bevezettek az országhatáron. A kémiai elhárítást általában rovarirtókkal végzik, de ezek csak azelőtt alkalmazhatók, mie-lőtt a nőstények behatoltak a bogyóba és hatástalanok a kávéfűró bogárra.

## Viharfelhők a világ kávétermelése és kávéital-fogyasztása felett



4. ábra. Koffein bioszintézis a purin alkaloidák bioszintézisével [11]



5. ábra. Kávéfűró bogár be- és kihatolása a kávégyümölcsbe [14]

A fentiek kiegészítéseként hangsúlyosan elmondható, hogy a kávéfűró bogár egy koffein-megszállott. Ugyanis ez a rovar egyetlen a kávékárosító kártevők közül, ami, mint említettük a koffeintartalmú kávé használja élelmeként és menedékhelyként, habitatként. Belefúrja magát a kávébabba és teljes életét ott tölti, ahol tömegéhez képest extrém mennyiségű toxikus koffeint fogyaszt, ami hasonlósági alapon körülbelül annyi, mintha egy körülbelül 70–75 kg-os embert körülbelül 500 csésze eszpresszó kávéitallal itatnánk meg. Megjegyzendő, hogy a koffein a kávéfűró bogár kivételével a legtöbb rovarra halálos mérgező és általában eredményes rovarirtóként is működik. Minderre úgy tekinthetünk, hogy a kávé koffeintartalma lényegében a kávé millió évek alatt kifejlesztett természetes védekezése a kávéfűró bogáron kívül minden más kórokozó ellen, de a kávénövény kifejezett balszerencséje, hogy egyetlen rovar, a kávéfűró bogár az összes többi rovartól eltérően kifejlesztett egy stratégiát, ami saját magát ellenállóvá teszi a koffein mérgező hatásával szemben.

### A kávéfűró bogár koffein-rezisztenciájának oka

A kávéfűró bogár fent ismertetett rezisztenciájának oka, valamint elhárításának módja 2015-ig ismeretlen maradt. Akkor merült fel Eoin Brodt (Lawrence Berkeley National Laboratory) és Fernando Véga (US Department of Agriculture) által vezetett kutatócsoportban a gyanú, hogy a rezisztencia oka nem magában a bogárban, hanem annak beleiben lévő baktériumokban rejtőzhet [17]. A kutatócsoport hipotézise szerint a kávéfűró bogár beleiben lévő mikrobák védhetik, oltalmazhatják a bogarat, elbontva minden koffeinmolekulát, amit a bogár magába vett, mielőtt a mérgező (koffein) felszívódhatott volna a bogár beleinek a falába. A bogár laboratóriumban tenyésztett törzsén végzett kísérletsorozat azt mutatta, hogy a hipotézis helyes volt. Ugyanis mint megmérték, rögtön a kávébabba való hatolás után a lárvák potyadéka (excrementuma) koffeinmentes volt, azaz a belek mikrobiái elbontották a bogár által elfogyasztott koffeint. Amikor azonban laboratóriumban tenyésztett rovarokat előzőleg antibiotikumokkal (tabaciklin, rifampicin, sztreptomycin) kezelték, ez megváltozott. A koffein kezdett megjelenni a potyadékokban és ettől maguk a bogarak kezdtek elpusztulni. Egy 44 napos kísérletben, ami a rovarok teljes életciklusát (pete, lárvák, gubó és felnőtt) felölelte, antibiotikummal sterilizálták a rovar beleit, más szóval elpusztították az ott lévő mikrobákat. Ennek eredményeként a tenyésztett törzsek bogárpopulációja 95%-kal csökkent és még azoknak a lárváknak is, amik nem pusztultak el, gubósítási nehézségeik voltak. Ez világosan kimutatta, hogy a bogarak úgynevezett „koffeinimmunitása” a beleikben lévő baktériumoknak köszönhető, azaz az ott lévő baktériumok óvják meg a bogarak életét. A nyitott kérdés azonban az volt, hogy melyek ezek a baktériumok?

Az eredmények igazolására a kutatócsoport vadon született bogarakhoz nyúlt. Bogármintákat szereztek hét, kávé termesztő országból és DNS szekvenálással meghatározták a beleikben található baktériumflórát (biotákat), illetve a baktériumflórákban

## Viharfelhők a világ kávétermelése és kávéital-fogyasztása felett

meghatározható baktérium-hasonlóságokat. Ehhez igénybe kellett venniük egy, a kutatócsoport által 2012-ben kidolgozott bravúros, mikromanipulátorokkal végzett, bogárbeleket kioperáló „sebészeti” (boncolási) eljárást [18].

A mérések alapján kialakítottak egy lényegében *Venn-diagrammnak* [19] mondható átfedési térképet, és a belekben található vad, és a laboratóriumban tenyésztett bogártörzsek baktériumflóra populációkból meghatározhatók voltak azok, amik mindegyik bogárban jelen voltak. Ezután a bogarakat olyan tápokon növesztették, amiknek az alapanyag-cseréjéhez kizárólagos szén és nitrogén forrása a koffein volt. Egyes bogarak képesek voltak túlélni ezt a diétát, mások nem. A túlélők közül a leggyakoribbak azok a bogarak voltak, amiknek beleiben a *Pseudomonas* faj, különösképpen a *Pseudomonas fulva* baktérium [20] volt. Ez a species, mint a genetikai elemzés kimutatta, egy *koffein demetiláz* nevű enzimmel van megáldva, ami a koffeint olyan valamivé változtatja, amit a normális alapanyagcsere enzimek kezelni tudnak, hasonlóan, mint az alábbiakban látható, a *Pseudomonas putida* esetében [21]: koffein + NAD(P)H + oxigén + H<sup>+</sup> <=> teabromin + formaldehid + NAD(P) + H<sub>2</sub>O. Tehát a *Pseudomonas fulva* (*P. fulva*) baktérium elpusztítása valószínűleg a koffeinbontás megakadályozása révén a kávéfűró bogarat is elpusztítja. Ezt a lehetőséget azonban a rovar, illetve bogár irtása érdekében a kávé termelő farmokon a gyakorlatban nem könnyű megtenni. Még akkor is, ha a kávéültetvények antibiotikumokkal való permetezése célszerű és megvalósítható lenne (ami korántsem biztos, mivel ekkor a lárvákba a célnak megfelelő antibiotikum-mennyiséget kellene juttatni), gyakorlatilag nem lenne kívánatos. Ugyanis az antibiotikumok túlzott használata még emberben is rezisztenciát okoz(hat). Mentséggént elképzelhető azonban egy más útja a *P. fulva* baktérium kiiktatásának. Ez egy olyan, bakteriofágként [22] ismert vírus megépítését, használatát igényelné, ami specifikus lenne a *Pseudomonas* elpusztítására. Ilyen fág már vizsgálat alatt van bizonyos *Pseudomonas-fajták* által okozott emberi betegségek kezelésére. A gyakorlatban valószínűleg egynél több típusú fagra lenne ehhez szükség, mert a *P. fulva* elpusztításakor egy másik koffeinfogyasztó baktérium a bogár beleiből előtérbe nyomulhatna és foglalhatná el a kiűtött baktérium helyét.

## Utószó

A kérdés, amit e dolgozat címe és a fentiek ismerete után fel kellene tennünk az, hogy valóban veszélyeztetve van-e ma a világ kedvenc italának, a kávének a hozzáférhetősége, fogyaszthatósága. Mint láttuk, a tudományos kutatás ugyan megtalálta a kávéfűró bogár-kártevés működési mechanizmusát, de a kártevő elhárítására még nem találta meg a végső megoldást. Annyit azonban a kutatás már felderített, hogy a titok nyitjaként nem maga a bogár ellen kell hadakozni, hanem annak beleiben lévő baktériumokat kel elpusztítani. Ha azokat sikerül bakteriofágokkal, vagy mással kiiktatni, elpusztul a bogár is, azaz a koffein megteszi a dolgát. A világ kávétermelését azonban jelenleg más veszélyek, mint például a szárazság és klimatikus változások [23] is negatívan befolyásolják. ennek ellenére a kávé világpiacán nincs hiány és a kávé, illetve a világ kávéital fogyasztói megnyugodva kiélhetik kávéivási szenvedélyüket.

Van azonban a kávétermelés károsítását elhárító biokémiai-mikrobiológiai kutatásnak egy másik, messzemenőbb eredménye is. Ugyanis a 2015-ben publikált tanulmány [17] egy teljesen új utat nyitott, tárt fel a kártevő ellenőrzésére. A kávé kívül számos kultúrnövény mérgeket termel s használ ahhoz, hogy megvédje magát a rovaroktól. Ezen termények megvédésénél az agronómusoknak és a növényvédőknek el kell gondolkodniuk azon, hogy a rovarirtásnál netalán rossz helyen, azaz magukra a rovarokra támadtak helyett, hogy a beleikben lévő baktériumokat igyekeznének irtani.

## IRODALOM

- [1] <https://hu.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1v%C3%A9>
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Coffee>
- [3] Braun Tibor, Bizar testközeli biotechnológia. A Kopi Luwak indonéz luxuskávé, Magy. Kém. Lapja, (2014) 69, 170
- [4] <http://factsanddetails.com/world/cat54/sub346/item1567.html>
- [5] <http://www.coffeecrossroads.com/>
- [6] <http://www.pewresearch.org/fact-tank/2013/12/20/chart-of-the-week-coffee-and-tea-around-the-world/>
- [7] [http://www.worldmapper.org/posters/worldmapper\\_1038\\_coffee\\_consumption\\_ver2.pdf](http://www.worldmapper.org/posters/worldmapper_1038_coffee_consumption_ver2.pdf)
- [8] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_coffee\\_drinks#/media/File:Coffee\\_drinks.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_coffee_drinks#/media/File:Coffee_drinks.jpg)
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Coffee>
- [10] <http://thescopepopculturescience.blogspot.hu/2015/07/living-off-nothing-but-coffee.html>
- [11] H.Ashihara, A.Crozier, Caffeine: a well known but little mentioned compound in plant science, Trends in Plant Sci., (2001) 6, 407
- [12] [http://addiction.lovetoknow.com/wiki/Coffee\\_Addiction](http://addiction.lovetoknow.com/wiki/Coffee_Addiction)
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Caffeine\\_dependence](https://en.wikipedia.org/wiki/Caffeine_dependence)
- [14] <http://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJM200104193441617>
- [15] [http://www.nyteknik.se/nyheter/it\\_telekom/allmant/article247458.ece](http://www.nyteknik.se/nyheter/it_telekom/allmant/article247458.ece)
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Coffee\\_borer\\_beetle](https://en.wikipedia.org/wiki/Coffee_borer_beetle)
- [17] J. A. Ceja-Navarro, F. E. Vega, U. Karaoz, Z. Hao, S. Jenkins, H. C. Lim, P. Kosina, F. Infante, T. R. Northen, E. L. Brodie, Gut microbiota mediate caffeine detoxification in the primary insect pest of coffee, Nature Commun., (2015) 6, 1.
- [18] J. A. Ceja-Navarro, E. L. Brodie, F. E. Vega, A technique to dissect the alimentary canal of the coffee borer (*Hypothenemus hampei*), with isolation of internal microorganism, J. Entomol. Acarlog. Res., (2012) 44, 117.
- [19] [https://en.wikipedia.org/wiki/Venn\\_diagram](https://en.wikipedia.org/wiki/Venn_diagram)
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudomonas\\_fulva](https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudomonas_fulva)
- [21] <http://biocyc.org/META/NEW-IMAGE?type=ENZYME&object=MONOMER-15754>
- [22] <https://en.wikipedia.org/wiki/Bacteriophage>
- [23] [http://www.ucsusa.org/global\\_warming/science\\_and\\_impacts/impacts/impacts-of-climate-on-coffee.html#.VdrBmiXtHlw](http://www.ucsusa.org/global_warming/science_and_impacts/impacts/impacts-of-climate-on-coffee.html#.VdrBmiXtHlw)



# Adat-, információ- és ismerettárolás az örökkévalóságnak

## Remények kvarcban és DNS-ben

### Előszó

Ahhoz, hogy írásunk igazi mondanivalójához eljussunk, induljunk el egy talán primitíven egyszerűsített úton, amelyen feltételezzük, hogy az emberi agyműködés, gondolkodás, illetve tevékenység eredményeképpen adatok keletkeznek, amelyek bizonyos folyamatokon keresztül információkká válnak, majd tudássá lényegülnek. Ezek a folyamatok az emberi agyban játszódnak le, s az adatok ott is maradnak mindaddig, amíg az egyéni aggyal valami végzetes, például halál nem történik, vagy amíg a tárolás érdekében, illetve későbbi felhasználáshoz azokat valahol, valahogyan, valamiben nem rögzítik. Bár az adat-, információ-, illetve ismeretrögzítésnek az emberiség történetében többféle változata alakult ki, például homokban (l. Arisztotelész), agyag- vagy kőtáblákon (asszírok, egyiptomiak), fonalszálokon (inka csomóírás), a mindmáig leginkább elfogadott és használt rögzítési lehetőségek a papírra történő nyomtatás (Gutenberg) és a szilíciumra épülő digitális elektronika.

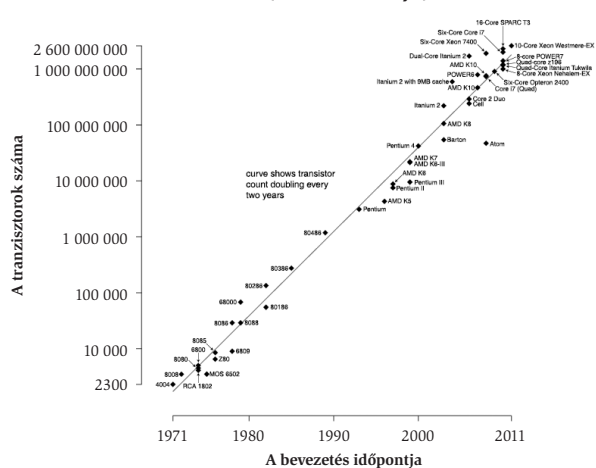
A fentiekkel kapcsolatos első kérdés az, hogy az említett hordozókra rögzítettek mennyire időtállóak. Az már jó ideje kiderült, hogy valószínű, hogy a papírra nyomtatott szövegek, amennyiben nincsenek agresszív közegeknek kitéve (tűz, víz, nedvesség, vegyszerek), több száz, sőt valószínűleg ezer évnél is tovább fenntarthatók, illetve használhatók. Ezzel szemben a főként műanyag hordozókon alapuló digitális elektronikai rögzítés (mágnesszalagok, CD- és DVD-rögzítők) évek alatt degradálódik, és a rögzített adatok viszonylag gyakran újrafelvételre szorulnak.

A megoldáskeresés kezdeti stádiumában a hosszú időre szóló elektronikus rögzítést az egyre nagyobb kapacitású szilícium-alapú mikroprocesszorokban, illetve az ezeket működtető számítógépekben látták, és ezek alapján egyre nagyobb méretű adattárházak, adattárolók épültek, bízva a Moore törvénye [1] által prognosztizált mikroprocesszor- és merevlemez-kapacitások növekedési sebességében (1. és 2. ábra). Bár a jelenlegi tranzisztorteknológiai határok pesszimista szemmel tekintenek a mikroprocesszor-kapacitások Moore törvénye alapján várható növekedésére, optimista futurologusok ezt, legalábbis 2020-ig, lehetőségeknek látják (3. ábra) [2].

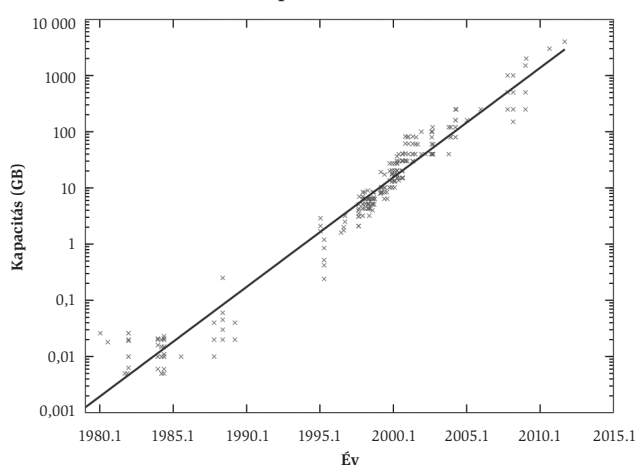
A tartósságon kívül – az egyre nagyobb mennyiségű adattárolásra képes számítógépek építésének folyamatosan növekvő helyigénye mellett – óhatatlanul előtérbe kerül a szilíciumalapú félvezetők hőtermelési problémája. Ugyanis a sűrűbb, erőteljesebb chipkekből épített szerverek melegekedése az energia, illetve a hő és a hűtés révén Moore törvényével fordított arányú költségnövekedéshez vezet.

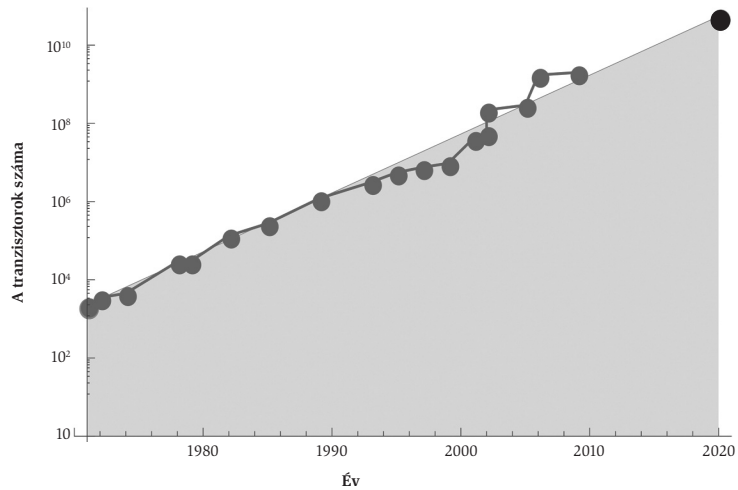
Ennek következtében például a költség/watt tényező kérdése jelentősen előtérbe került világszerte ott, ahol az adattárolási kapacitás növelése felmerült, olyannyira, hogy néhol abszurdnak tűnő gondolatok is születtek, mint nagy adattároló központoknak a sarkkör vidékére való telepítése.

1. ábra. A mikroprocesszorokba sűrítendő tranzisztorok száma 1971 és 2011 között (Moore törvénye)

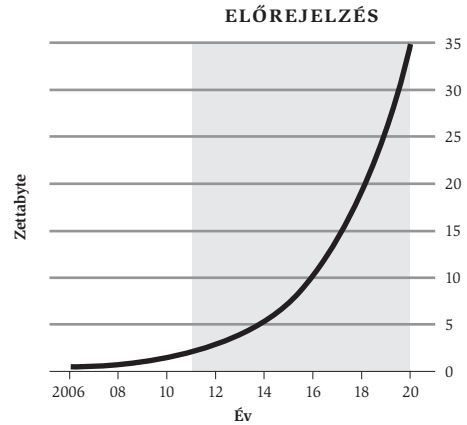


2. ábra. A merevlemezek kapacitásának időbeli változása





3. ábra. Moore törvényének kiterjesztése



4. ábra. Exponenciális adat- és információ-növekedés [7]

### Világmeretű adatnövekedés

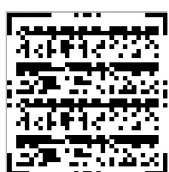
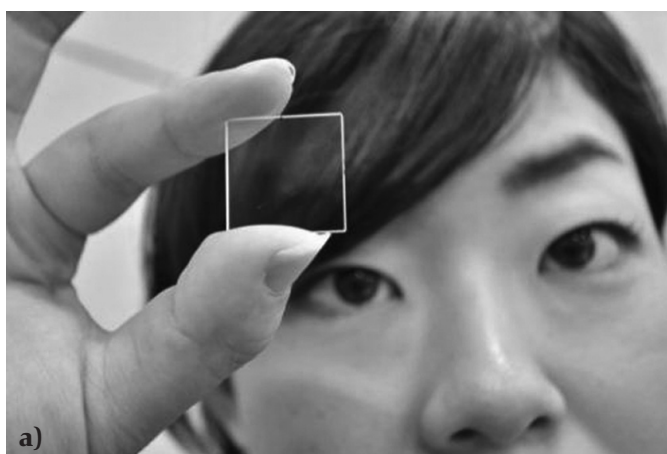
Ahhoz, hogy kissé jobban átláthassuk a címben felvetett témát, nem tudjuk elkerülni a mennyiségek és méretek kérdését [2]. Megemlítjük, hogy időszámításunk kezdete óta 2003-ig az emberiség öt millárd GB ( $5 \cdot 5^{15}$  byte) információt hozott létre. Amennyiben ez nem eléggé lélegzetelállító, akkor a növekedési sebesség érzékeltetésére hozzátehetjük, hogy csupán 2011 óta a fenti mennyiség kétnaponként jön létre, és ha marad érzékelésre megfelelő levegő, ez az idő 2013-ben tízpercenkéntre zsugorodott [4]. Más szóval a világon tárolandó adatmennyiség exponenciálisan (4. ábra) halad a zettabyte ( $10^{21}$  byte), sőt a yottabyte ( $10^{24}$  byte) felé. Ezek után nem tűnik feleslegesnek elmerengeni azon, hogy az adattárolás jelenlegi fejlettsége, illetve sebessége révén a tárolás milyen helyigényeket és anyagi költségeket vet fel. Egyetlen példaként megemlítjük, hogy egy IBM-értékelés szerint egy exabyte-nyi ( $10^{18}$  byte) orvosi adatmennyiség további feldolgozási célból való mozgatásának költsége könnyen elérheti a 10 millió dollárt. Ez a költség a fájlok igénybeviteléhez szükséges jelenleg használt hardvert, szoftvert, energiafelhasználást és munkaerőt foglalja magában.

### Adattárolás kvarclapkákban

A közelmúltban a Hitachi, a japán elektronikus óriáscég közzétette, hogy a Kiotói Egyetemmel együttműködve kidolgozták a maratott kvarclapkákban alapuló, millió évekig megmaradó, gyakorlatilag degradáció nélküli adat- és információ-tárolást [4]. Az elért adatsűrűség 40 MB négyzet hüvelykenként, ami valamivel nagyobb, mint a műanyag CD-k körülbelül 35 MB-nyi tárolási kapacitása. A prototípust egy kétszer két centiméter méretű, két milliméter vastagságú maratott kvarclapkán mutatták be. A lapkákba femtoszekundumos ( $10^{-15}$  s) lézer által generált fénypulzusokkal négy rétegben pontokat égetnek be. A fénypulzusok bináris, a QR-kódhoz [6] hasonló optikai képet hoznak létre (5. ábra). Ezeket a kódolt lapkákat több száz millió évi avulással felérő, két órán át tartó, 1000 °C fokú hevítéssel tesztelték. Az optikai mikroszkóppal olvasható kód háborítatlanul megmaradt a lapkákon. Lévéen, hogy a kódpontok a kvarclapkák belsejében vannak, azokat felületi erózió nem érinti, mint ahogy savas vagy lúgos vegyületek sem. A lapkák olvasására a Hitachi cég speciális optikai mikroszkópot készített. Mivel a mikroszkóp egy pontrétegre való fókuszálása elhomályosítja a többi réteget, a Hitachi olyan módszert dolgozott ki, ami 15 dB pontossággal szűri ki a homályosodást. Ez gyakorlatilag hiba nélküli adatleolvasást tesz lehetővé. A Hitachi cég olyan gyakorlati megvalósításban gondolkodik a közeljövőben, amiben a kvarclapkákból a Corbis fotógyűjteményhez [6] hasonló archívumokat hoznak létre, amiket nulla Fahrenheit-fokon ( $-18$  °C) tárolnak.

### Adattárolás DNS-ben

A DNS alkalmazása adatok tárolására genomok formájában nem tekinthető újnak [8], miután azt teszi minden élő szervezet a Földön [10]. Jelentősnek nevezhető áttörés ezen a téren a közelmúltban történt, amikor angliai, egyesült-államokbeli és magyar kutatók közzétették eredményeiket *Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA* címmel a *Nature* című folyóiratban [11]. Ezek több szempont szerint is jelentősnek tűnnek azáltal, hogy 739,3 kB-ra, rekordmennyiségűre sikerült növelni az egyedi kódolt információt. Ezt úgy hozták létre, hogy a jóval szélesebb körű megvalósításokra is lehetőséget nyújtanak. A kidolgozott eljárás nagyjából rögzíteni tudná a világban felhalmozott 3 zettabyte ( $3 \times 10^{21}$  byte) információt, jelentős bővítési lehetőséggel. Ezt 2,2 petabyte ( $2,2 \times 10^{15}$  byte) sűrűséggel tennék, azaz úgy, hogy elférne egy kisebb teherautó hátulján, és persze úgy, hogy komoly mértékben csökkentené azokat a másolási hibákat, amelyeknek az eddig javasolt rendszerek ki voltak téve.



KÓDOLT AMINOSAV				
	A	C	G	T
0	C	G	T	A
1	G	T	A	C
2	T	A	C	G

1. táblázat. A háromdigites kódolás

5. ábra. a) a Hitachi-féle kvarclapka

b) A lapkára lézerrel égetett QR-kódrendszer

Az eljárás újdonsága abban rejlik, ahogy az említett kutatók a fájljaikat a merevlemezekről kémcsövekbe vagy tintasugaras 2D nyomtatóval üveglapocskákra átkódolják [12]. A DNS négy bázist, az adenozt (A), a timint (T), a citozint (C) és a guanint (G) használja az információ kódolására. A korábbi próbálkozások gyakran a számítógépek által használt bináris 1-gyel és 0-val kódolták ezeket. Például A és C jelentheti a 0-t, illetve G és T az 1-et. A probléma abból adódik, hogy a forráskód 1-es, vagy 0-s szekvenciái egyéni bázis ismétlését okozhatják a DNS-ben (például TTTT). Az ilyen ismétléseket könnyen félreolvassák a DNS-szekvenáló gépek, ezáltal hibákhoz vezethetnek az információ visszaolvasásánál. A megoldást a bináris (kétdimenziós) számítógépes információról a terner (háromdimenziós), azaz három számra, 0, 1 és 2-re való áttérésben, illetve annak az információnak a DNS-be való bekódolásában találták meg. Egy bizonyos kódolási séma attól függ, hogy melyik bázis volt az előző. Amennyiben az előző bázis A volt, akkor a 2-t a T jelzi. De ha az előző bázis a G volt, akkor a 2-t a C képviseli (**1. táblázat**). Hasonló helyettesítési szabályok érvényesek a számok és betűk minden kombinációjára, biztosítva azt, hogy az adatokban a hasonló számjegyek (digitek) szekvenciáit ne képviseljék a DNS-ben egymáshoz hasonló számjegyek szekvenciái, ezáltal elkerülve a hibalehetőségeket.

Ezt a kódolást ezután a szintetikus DNS-nél kellett megvalósítani. A legegyszerűbb megközelítés egyetlen hosszú DNS-szál szintetizálása volt minden tárolandó fájlhoz. Sajnos, ma még a DNS-szintetizáló berendezések ezt nem tudják megbízhatóan elvégezni. Ezért a fájlokat több ezer egyedi, 117 bázis hosszúságú darabra vágták. Minden darabban 100 nukleotid tükrözi a fájl adatait, a maradék rögzíti azt, hogy a kódolt fájlban hová tartozik egy bizonyos darab. A folyamat tartalmazza a legtöbb számítógéprendszerben található hibajelző „parity bit” DNS-megfelelőjét.

A hibalehetőségek további elkerülésére a forrásfájlokat, mindegyiket kissé különböző átlapoló módon, háromszorosan továbbdarabolták. Ez azért történt, hogy a 100 bázisdarab minden 25 nukleotiddarabból álló negyede is képviselve legyen a DNS három másik darabjában. Amennyiben bármilyen másolási hiba előfordult egy bizonyos darabban, azt össze lehetett vetni a három másik darabbal, és egy többségi helyzet eldönthette, hogy melyik volt a pontos. A darabok visszaolvasása egyszerűen úgy történik, hogy a fragmensekről többszörös másolatokat generálnak sztenderd kémiai reakció útján, majd ezeket a DNS-szekvenálóba táplálják, és ott a fájlokat összeillesztik.

Amikor ezt a sémát tesztelték, csaknem a tervezett szerint működött. Az említett kutatóknak sikerült öt számítógépes fájl kódolni és dekódolni, ezek között *Martin Luther King* „I have a dream” című MP3-on rögzített beszédének egy részét, illetve *Francis Crick* és *James Watson* 1953-as, a DNS-szerkezetét leíró cikkének pdf-változatát. Az egyetlen gubanc az volt, hogy minden elővigyázat ellenére a DNS-cikk két 25 bázisnyi szegmense elszállt. A hibát végül is egyrészt a DNS kémijának, másrészt a szintetizálásnak tulajdonították.

Mint mindenben, a DNS-ben való adattárolásnak is vannak árnyoldalai. Az egyik az a relatív lassúság, amivel az adatok visszaolvashatóak. A kutatóknak két hetét vette igénybe a fent említett öt fájl visszaépítése, bár leírták, hogy jobb berendezéssel egyetlen nap alatt is elvégezhető lett volna. És persze a folyamat tovább gyorsítható lett volna több szekvenáló berendezés igénybevételevel. A másik hátrányt a jelenlegi stádiumban a költségek jelentik. Kiszámították, hogy kereskedelmi árakon a DNS-tárolás kódolása körülbelül 12 500 dollárba kerülne tárolt MB-onként. Ehhez jönne MB-onként a dekódolás 200 dollárja. Tehát a jelenleg használt mágnesszalagon való digitális információ tárolásnak ez  $10^6$ -szorosába kerülne.

## *Adat-, információ- és ismerettárolás az örökössé válásnak*

De mint a bevezetőben már említettük, a mágnesszalagok degradálódnak, öregsznek és néhány évenként újakkal pótolandók, míg a DNS milliárd évekig olvasható marad, ha hűvös, sötét és száraz helyen tárolják, amint a neandervölgyi gyapjas mamutok maradványaiból kivont DNS-leolvasás bizonyította.

Minél hosszabb időre tárolandó az információ, annál vonzóbbá válik a DNS, azt nem is említve, hogy a DNS-szintézis és -szekvenálás költségei rohamosan csökkennek. Úgy tűnik, hogy körülbelül egy évtized múltán a DNS versenyképessé válhat olyan adatbázisok tárolására, amelyek ötven évre, vagy hosszabb időre megőrzendők.

## Utószó

A technológia kutatása óhatatlanul előtte jár a technológia pillanatnyi fejlődési szintjének, de természetesen igyekszik azt utolérni. Ez annál is inkább igaz, ha a fejlődés már kopogtat a mindennapok kapuján, de a járulékos szükségletek bizonyos mértékben lemaradtak. Gondolunk itt a kvarclapkákat olvasni tudó gyors és önműködő mikroszkópokra, vagy a DNS-láncokat szintetizáló, illetve szekvenáló még gyorsabb, olcsóbb berendezésekre. Nem kétséges, hogy a lemaradás behozható, sőt ez meg is fog valósulni. Az, hogy ezzel az alapkérdés megnyugtatóan megoldódik-e, vagy akkorra, amikor a lemaradás megteszi az utolsó lépést, az alapkérdés – más irányból szemlélve – megint eltávolodik, ma még nyitott kérdés.

## IRODALOM

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law)
- [2] <http://www.zdnet.com/2020-the-visible-end-of-exponential-innovation-7000019987/> (utolsó hozzáférés: 2013. október 18.)
- [3] P.Thibodeau: China's "big hole" marks scale of supercomputing race. Computerworld, [http://www.computerworld.com/s/article/9187702/China\\_s\\_big\\_hole\\_marks\\_scale\\_of\\_supercomputing\\_race](http://www.computerworld.com/s/article/9187702/China_s_big_hole_marks_scale_of_supercomputing_race) (utolsó hozzáférés: 2013. október 17.)
- [4] P. Gilster: Data Storage: The DNA Option. Centauri Dreams. Imagining and Planning Interstellar Exploration. January 28, 2013, <http://www.centauri-dreams.org/?p=26262> (utolsó hozzáférés: 2013. október 17.)
- [5] M. Sakakura, T. Tochio, Y. Ishiguro, M. Nakabayashi, Y. Shimotsuma, K. Hirao, K. Miura: Dynamics of fracture inside a single crystal induced by a focused femtosecond laser pulse, Proc. SPIE 8530, December 4, 2012, DOI: 10.1117/12.976339 in: G. J. Exarhos, V. E. Gruzdev, J. A. Menapace, D. Ristau, M. J. Soilean, (Eds.): Laser Induced Damage in Optical Materials, Boulder, Colorado, September 23, 2012.
- [6] [http://hu.wikipedia.org/wiki/QR\\_k%C3%B3d](http://hu.wikipedia.org/wiki/QR_k%C3%B3d) (utolsó hozzáférés: 2013. október 18.)
- [7] History flushed. Digital archiving, The Economist, April 28th 2012, <http://www.economist.com/node/21553410> (utolsó hozzáférés: 2013. október 17.)
- [8] E. S.Baum: Building an associative memory vastly larger than the brain. Science (1995) 268, 583.
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/DNA\\_digital\\_data\\_storage](http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_digital_data_storage) (utolsó hozzáférés: 2013. október 17.)
- [10] <http://ghr.nlm.nih.gov/handbook/basics/dna> (utolsó hozzáférés: 2013. október 18.)
- [11] N. Goldman, P. Bertone, S. Chen, C. Dessimoz, M. LeProust, B. Sipo, E. Birney: Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA, Nature, (2013) 494, 77. DOI:10.1038/nature11875
- [12] DNS – Az adattárolás jövője, <http://www.peetandcook.hu/component/k2/item/107-dns-az-adatt%C3%A1rol%C3%A1s-j%C3%B6v%C5%91je> (utolsó hozzáférés: 2013. október 17.)



# Bizarr testközeli biotechnológia

## A Kopi Luwak indonéz luxuskávé

### Előszó

Nem valószínű, hogy hazánkban az indonéz nyelv ismerete igazán elterjedt lenne, de a címben említett indonéz szavak megismerését lehetővé tette elterjedtségük. Előzetes magyarázatként a *kopi* indonézül kávé jelent, *luwak*nak egy macskaszerű, a ragadozó emlősök, a *Viverridae* családjába tartozó cibetmacskát, illetve pálmásodróként is ismert állatot neveznek. *Kopi Luwak* [1] márkanéven egy főleg indonéziai eredetű, méregdrága kávé forgalmaznak, amelyet gasztronómiai ínycsikmélként és luxustermekként kínálnak. Ezt az említett állatka szerintünk testközeli biotechnológiai folyamatként dolgozza fel és bocsátja (pottyantja) ki a táplálkozásaként fogyasztott kávécsérjéken termelt kávébogyókból.

### Bevezetés

A továbbiakban célszerű a biotechnológia tudományának definíciójával kezdenünk. „A biotechnológia élőlények segítségével végzett technológia. A tudomány és technológia alkalmazása élő szervezeteken, azok részein, termékein, vagy modelljén azzal a céllal, hogy megváltoztassunk élő vagy élettelen anyagokat tudás, termékek vagy szolgáltatások létrehozásáért. A szűkebb értelmezés szerint a biotechnológia fogalmán a kifejezetten profitorientált ipari és mezőgazdasági tevékenységet értik” [2]. Bár a biotechnológia több más definíciója is rendelkezésre áll, egy kitűnő hazai tankönyv szerint „mi sem jellemzi jobban a definíciók sokféleségét, mint az, hogy az USA kongresszusa is szükségét érezte a fogalom definiálásának 1984-ben: „Biotechnologies are commercial techniques, that use living organisms or substances from these organisms, to make or modify a product, including techniques used for the improvement of the characteristics of economically important plants and animals and for the development of microorganisms to act on environment” [3].

A fogalmat egyébként egy magyar mérnök, *Erekly Károly* vezette be 1919-ben mindazon munkafolyamatokra, amelyek során a nyersanyagokból terméket állítanak elő organizmusok segítségével” [3]. Erekly definíciójával messzemenően egyetértve ezenel visszatérhetünk az előszóban említett luwakra (cibetmacskára), ugyanis a főleg Szumátra, Jáva, Bali és Sulawezi indonéz szigeteken őshonos cibetmacska, mint már említettük, az ott termesztett kávécsérjék érett, piros kávébogyóival táplálkozik. Miután a kávébogyók héja az állatka gyomrában, illetve gasztrointesztinális terében feldolgozásra kerül, az emésztetlen kávébabok a székllettel ürülnek. A babszemeket onnan kiválogatják, mossák, tisztítják, majd hasonló feldolgozáson mennek keresztül, mint a nem gyomorból származó kávébabszemek (például pörkölés). Ezt a kávé jelenleg a világ legexkluzívabb és legdrágább kávéfajtájaként forgalmazzák.

### Bioreaktor, chemosztát, biosztát

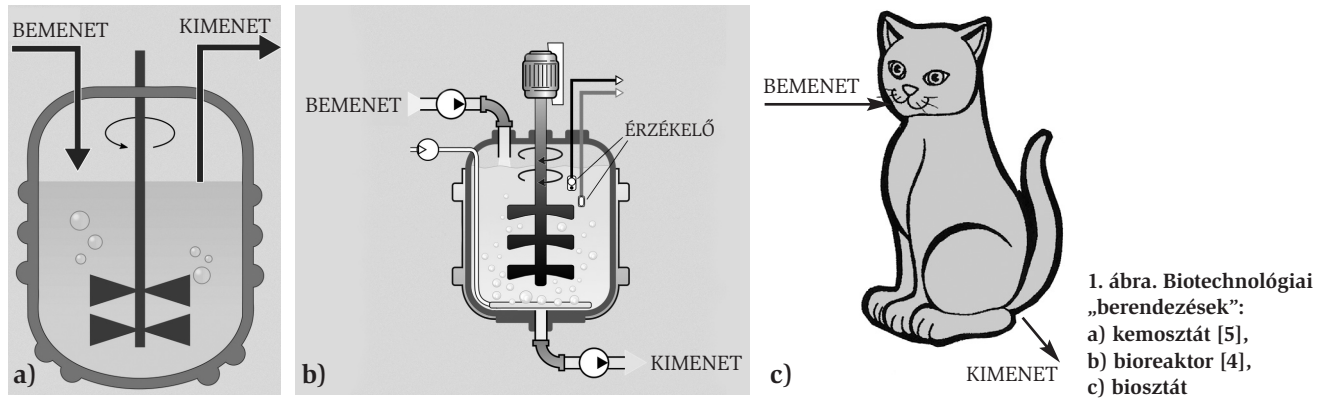
Ami az érett kávébogyókkal történik a cibetmacska belsejében, azt biotechnológiai folyamatnak tekinthetjük, és ha ezt tesszük, akkor analógiaként a biotechnológiában használatos berendezésekhez, a *kemosztátokhoz*, illetve bioreaktorhoz hasonlóan a kávébogyók feldolgozása során a cibetmacska szervezetét a feldolgozás során igénybe vett kémiai, illetve biokémiai folyamatokra való tekintettel úgymond „testközeli” bioreaktornak; azaz az eddig nem használt, de itt bevezetett *biosztát* névvel illethetjük (**1.c ábra**).

Hozzátehetjük, hogy bioreaktornak neveznek bármilyen gyártott, illetve épített edényt, vagy műszaki berendezést, vagy rendszert, ami fenntart egy biológiailag aktív környezetet (**1.b ábra**). Mint az ábrán látható, a bioreaktorba egy felső nyíláson keresztül táplálják bele a feldolgozandó komponenseket, amelyekkel az edényben bizonyos biokémiai folyamatok történnek, majd a termékeket egy alsó nyíláson (kimeneten) kiengedik [4].

A folyamatosan működő bioreaktorokat *kemosztátként* jellemzik, miután egy ilyen berendezésben a kémiai környezet állandónak, azaz statikusnak tekinthető [5] (**1.a ábra**). Mint látható, ez az edény ugyancsak egy bemenő, és egy kimenő, azaz ürítő nyílással rendelkezik. Mindkét berendezés működtetését villamos, illetve mechanikai energia biztosítja.

A fentiekkel összehasonlítva, illetve analogizálva miért ne tekinthetnénk egy nyersanyag (jelen esetben a kávébogyók) biotechnológiai feldolgozása során egy élő szervezetet (jelen esetben a cibetmacskát) biosztátnak, azaz olyan bioberendezésnek, amelybe felül (jelen esetben az élő állatba) betöltődik (úgy, hogy a cibetmacska megeszi) a nyersanyag (a kávébogyók), és a szervezet bioenergia igénybevételével azt feldolgozza, majd a produktum (jelen esetben az ürülék és a kávébabok) az alsó nyíláson távozik (**1.c ábra**).

## Bizarr testközeli biotechnológia



Forrás: UN Food & Agriculture Organisation (FAO)

Brazília	2,70
Vietnam	1,28
Kolumbia	0,47
Indonézia	0,63
Etiópia	0,37
Peru	0,33
India	0,30
Honduras	0,28
Mexikó	0,25
Guatemala	0,24
A világ összesen	8,46

1. táblázat. A nyerskávétí legnagyobb termelője – 2011 [7]  
(millió tonna)

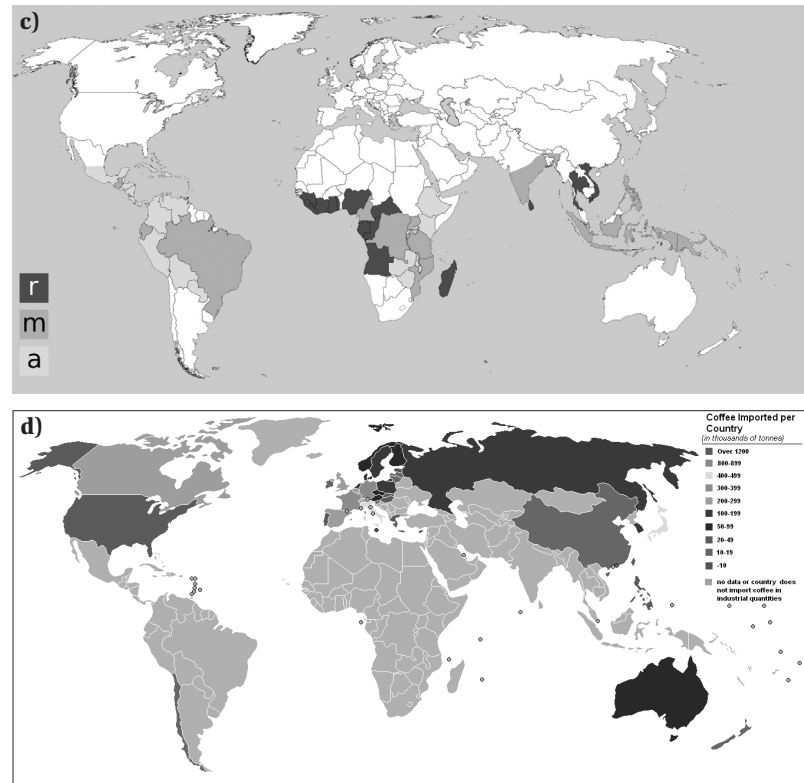
Mindebben csak az a szokatlan, de nevezhetjük a közízlés és az ürülék említésével a prűdséget is tekintetbe véve bizarrnak, hogy a biotechnológiai folyamat végterméke ürülékként távozik a luwak-biosztátból és kerül további feldolgozásra (például pörkölésre), illetve gasztronómiai felhasználásra (kávéital készítésére) és fogyasztásra.

## Kávét a világban

A kávé, illetve a kávécsereje (2.a ábra) gyümölcséből (2.b ábra) főzött kávéital jelenleg a világ egyik legnépszerűbb, leggyakrabban fogyasztott itala. Úgy tudják, hogy naponta több mint 2,5 milliárd csésze kávéfogyasztanak világszerte [12].

A világ kávétermelésének több mint 90%-a fejlődő országokban folyik (1. táblázat, 2.c ábra). Ez 2011-ben 8,46 millió tonnát jelentett. A fogyasztás

2. ábra. a) Kávécsereje, b) gyümölcse, c) a világ kávétermesztői, r: canephora, m: canephora és arabica, a: arabica [7], d) a világ kávéimportőrei [8]



szempontjából a hangsúly erősen áttolódik a világ fejlett régióira (**2.d ábra**). A termelés megoszlik a különböző fajták között, amelyek leggyakoribbait a **2. táblázat** mutatja be.

A kávé eredete az etiópiai hegyvidékre vezethető vissza, de az arabok már a 17. században termesztették. Az új világba és a szubtrópikusokra a 17. században került. A kávécsereje botanikailag a *Rubicacea* családnak tartozik. A kávé minősége számos szemponttól függ, például a növény kiválasztásától, a növekedési körülményeitől, a későbbi pörköléstől, illetve erjesztéstől. A feldolgozás egyik legfontosabb lépése, mint említettük, a pörkölés. Ennek folyamán számos fizikai változás történik a kávébabban párhuzamosan végbemenő kémiai reakciók során (Maillard- és Strecker-reakciók aminosavak és cukrok között), amelyek különböző mechanizmusokkal több ezer vegyületet hozhatnak létre. Ezek a változások kritikus befolyást gyakorolnak a kávé ízére, aromájára, színére és végső jellemzőire. Például körülbelül 800 illékony vegyületet azonosítottak a pörkölt kávé aromájában [13].

Az említett világtermelési és forgalmazási méretek mellett teljesen érthetővé válik, hogy a kávé ára számos gazdasági és kereskedelmi tényezőtől függ, de itt talán elegendő megemlíteni, hogy a kurrens ár kilónként körülbelül 2,5–3,0 dollár körül mozog [14].

## A Kopi Luwak

A Kopi Luwak kávé története körülbelül 200 évre nyúlik vissza, amikor holland telepesek kávéültetvényeket kezdtek telepíteni az akkori gyarmatokon, azaz a mai Indonéziához tartozó Jáva, Szumátra és Szulavézi szigeteken, de megtiltották a bennszülött farmereknek és az ültetvényeken dolgozóknak a kávébogyótermés használatát. A szigeteken honos, részben rovarokkal, kisebb állatokkal és gyümölcsökkel táplálkozó ragadozók, a cibetmacskák (luwakok, **3.a ábra**), az új lehetőségekből eredően rákaptak a kávécserejék érett, piros bogyóinak a fogyasztására. A tilásból eredően az ültetvények dolgozói elkezdtek gyűjteni és mosni, tisztítani a cibetmacskák potyadékat. Nem világos, hogyan jöttek rá, vagy kinek jutott eszébe a potyadékból (**3.b ábra**) tisztított, majd pörkölt babokból kávé főzni, amiről megállapították, hogy egészen különleges íze, illata, aromája és zamata van. Innen indult a Kopi Luwak kávé termelése és forgalmazása (**3.c ábra**). A kávéból csak körülbelül 150–230 kilogrammot termelnek világszerte, és jelenlegi kilónkénti ára körülbelül 1000–3500 dollár között mozog [15–16].

## A kávébab feldolgozása, a kávéital érzékszervi (kóstolási) értékelése, fizikai és kémiai analízise

Érdekes talán végigfutni azon a feldolgozási folyamaton, amelyen általában a különböző változatú kávébabok a kávéital elkészítése (főzése) előtt végigmennek. A lépésről lépésre megvalósított folyamatot a **4. ábra** mutatja be a Kopi Luwak és a hagyományos változatú kávéfajták feldolgozásánál. Mint látható, a két folyamat teljesen megegyezik, kivéve a kávébab luwak-féle (biosztátos) fermentációját [17].

Egy indonéziai folyóiratban 2012-ben megjelent cikk [17] a következő kérdésekkel foglalkozott:

- a luwak eredetű kávébab kémiai összetétele és annak összehasonlítása a hagyományos (arabica-robusta) összetételével,
- említett kávébabokból főzött kávéitalok íz-összehasonlítása nemzetközileg elfogadott eljárás szerint [15–16].

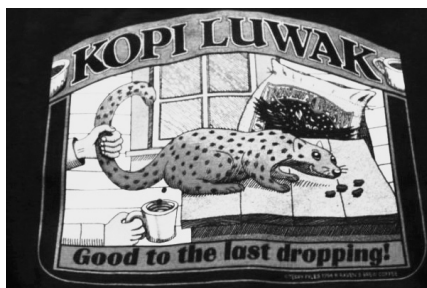
Az úgynevezett hedonikus (érzékszervi) eljáráshoz [15] kávéitalt kedvelő, gondosan kiválasztott értékelők (kóstolók) külön-fülkében, elválasztva végezték a vizsgált kávéitalok íz- és illatrangsorolását. Az érzékelt íz-összehasonlítást számszerűen jelezték a következőképpen: 5 (nagyon jó), 4 (jó), 3 (normális), 2 (nem jó), 1 (nagyon nem jó). Az eredmények statisztikai feldolgozása szignifikáns különbségeket mutatott a kávéfajták között ( $p > 0,01$ ), amint az **5.a ábrán** is látható és érdekes módon úgy az íz, mint az illat szempontjából a Kopi Luwak kapta a kedvezőbb értékelést [17].

A kémiai elemzések is mutattak ki szignifikánsnak nevezhető különbségeket, ezek közül az alacsonyabb koffeintartalom volt a jelentősebb, ami ennek megfelelően a kevésbé keserű ízben is megnyilvánult. Ezzel szemben a luwak-kávéban kisebbnek mutatkozott a fehérjeteralom is (**5. ábra**). De ez a csökkentett koffeinnel együtt okozhatta a kevésbé keserű ízt.

A leírt vizsgálatokat végző indonéz szerzők az észlelt különbségeket nagyjából kedvezőnek tekintették, és a megnövekedett minőséget főleg – a luwak (biosztát) gasztrointesztinális terében – a kávébabban végbemenő savasítási, enzimatis és bakte-

Család	Génusz	Fajta	Változat
Rubicacea	Coffea	Arabica	Typica
		Canephora	Robusta
		Liberica	

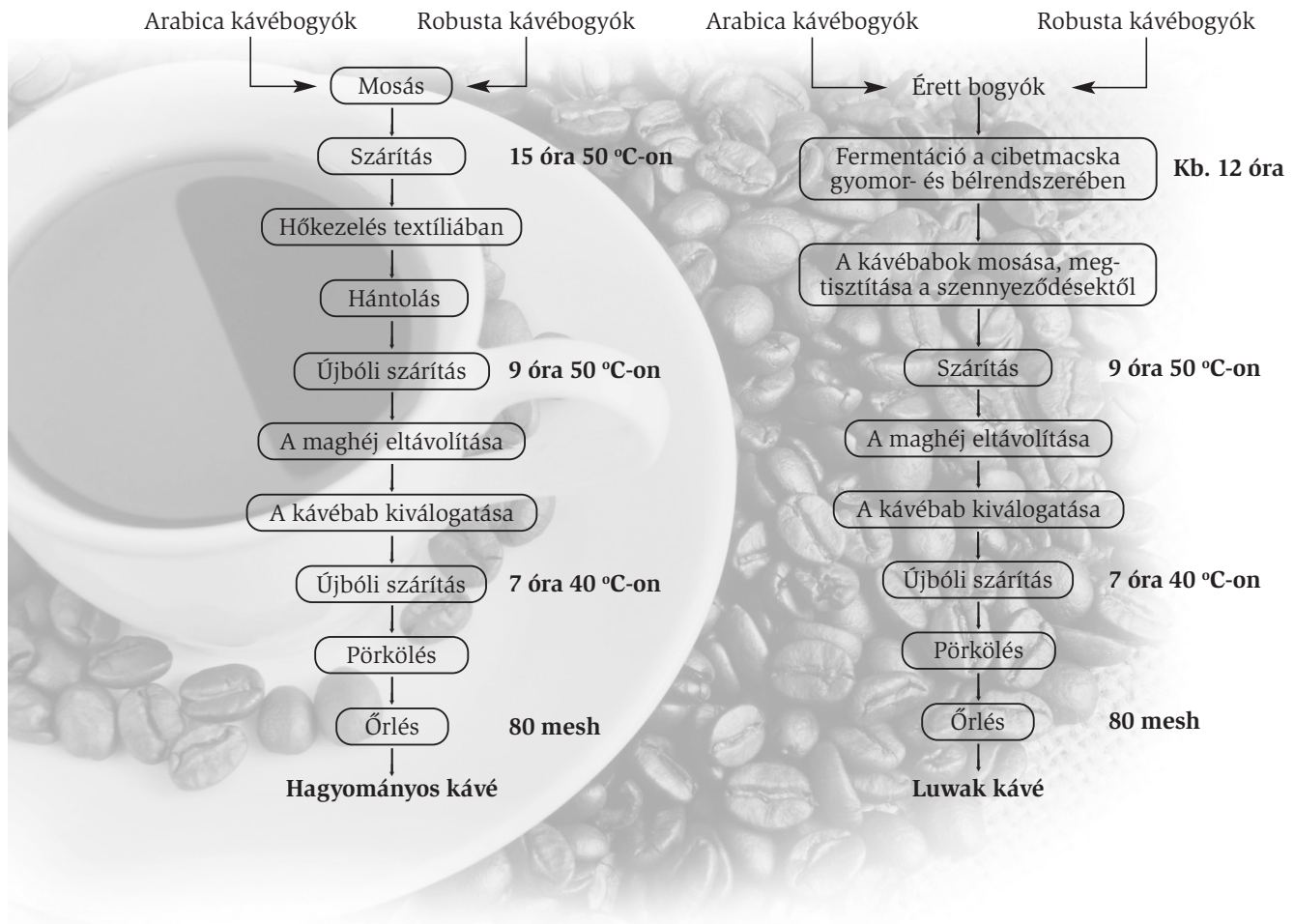
2. táblázat. Kávék [6]



3. ábra. A luwak (biosztát) és bemeneti nyersanyaga (a) [9], kimeneti végterméke (b) [10], és a Kopi Luwak méregdrága indonéz luxuskávé reklámcsoomagolása (c) [11]

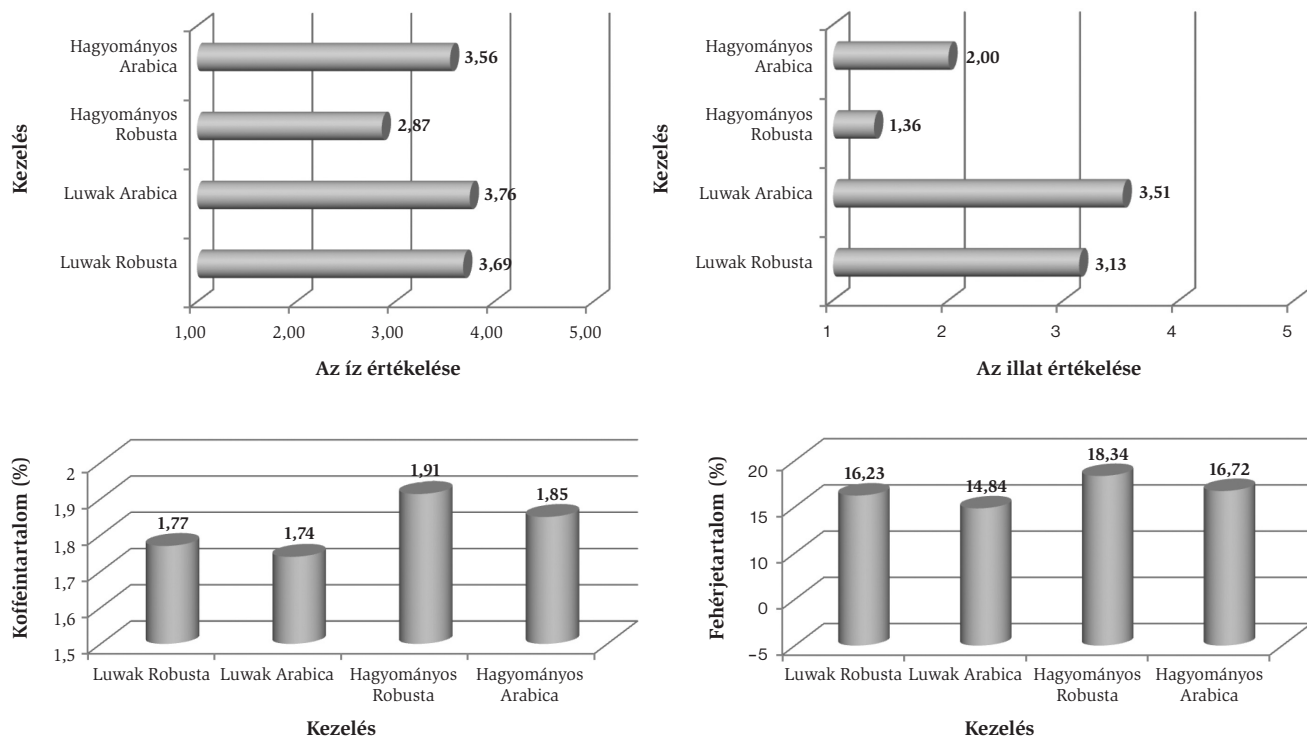


## Bizarr testközeli biotechnológia

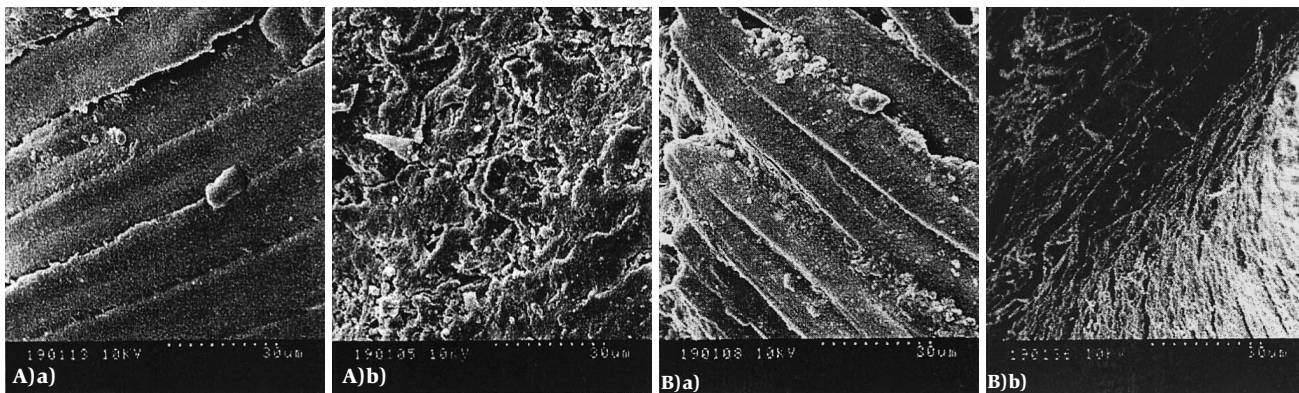


4. ábra. Kávéitalok feldolgozása [17]: a) hagyományos kávé, b) luwak kávé

5. ábra. Kávéitalok érzékszervi és analitikai kémiai elemzése [17]







**6. ábra.** 10 000-szeres nagyítású pásztázó elektronmikroszkópos felvételek [19]. A)a Kopi Luwak kontroll kávébab (nem ment át az állaton), A)b) Kopi Luwak kávébab. B)a) Etiópiai kontroll kávébab, B)b) etiópiai cibetmacskán átmert kávébab

riális folyamatoknak tulajdonították. Egy nagyon alapos és részletes kanadai vizsgálat [19], amelynek szerzője valószínűleg nem ismerte a fentebb leírt indonéz eredményeket, több szempontból is hasonló adatokhoz jutott, de azokat kiegészítette és gyarapította. A kiegészítés azzal is jellemezhető, hogy a vizsgálat kiterjedt az indonéz luwak (cibetmacska) Etiópiában honos rokonára is (etiópiai cibetmacska), és számos műszeres fizikai és kémiai mérésre támaszkodott, például kolorimetriára, SDS-PAGE elektroforézisre, mechanikai, reológiai, elektronikusor-vizsgálatra, valamint mikrobiológiára és érzékszervi vizsgálatokra is.

A fentieket kiegészítendő a különböző eredetű kávébabokat pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatoknak (1000, 5000 és 10 000-szeres nagyítással) is alávetették. A felvételek 10 000-szeres nagyításai a **6. ábrán** láthatók.

Bár a különböző kávébabok színárnyalata más volt a babok eredetétől függően, a színváltozás nem volt alkalmas a biosztált kávék eredetének az eldöntésére, de azt igazolni látszott, hogy az emésztési biokémikáliák (gyomorsav és proteázok) az állat gyomrában áthatoltak a kávébogyó külső héjburkán és elértek a kávébab felületére, ahol a színváltozás történhetett.

Amint a **6. ábrán** látható, a gyomorkezelt kávébabok felülete jelentősen különbözött a kezeletlenektől, erős gödrösödést, rücskösödést mutatva a gyomornedvek hatására. Ez a szerző szerint indikációként használható a gyomorkezeletlen kávébaboktól való megkülönböztetésre. A fentiek eredményeképpen állítható, hogy a rücskösített kávébabfelületen keresztül a gyomornedvek könnyebben behatolhattak a babokba, és ott a fehérjéket proteolitikus bontásnak teheték ki. Ezt a babokon végzett SDS-PAGE elektroforetikus méréseknél tapasztaltak is igazolták. Mivel a fehérjék bomlása a keletkező aminosavak mennyiségének a növekedéséhez vezet, ezek a pörkölés közben végbemenő Maillard-barnulás révén észlelhető, illetve mérhető hatást gyakorolhatnak az állati eredetű kávék íz- és aromajellegére a kontrollbabokkal szemben.

Azt is érdekes újra megjegyezni, hogy a fehérjék mennyiségének a csökkenése hozzájárulhat a luwak-kávék keserű ízének a csökkenéséhez is, mivel a fehérjéket tartják bizonyos pörkölés közben keletkező keserű komponensek prekursorainak.

A [19] hivatkozásban részletezett vizsgálat szerint a kávébabok ásványi komponensei terén nincs jelentős különbség a babok között. Ennél viszont sokkal érdekesebb, hogy bakteriális szempontból sincs, sőt a luwak-babok kisebb bakteriális szennyezettséget mutattak. Feltételezik, hogy ez abból ered, hogy a potyadékból származó babok mosása és tisztítása alaposabban történt. Bár az elektronikus orral végzett vizsgálatok a pörkölt és őrölt kávékkal jól megkülönböztethető aromajelleget mutattak a luwak-kávéknál, ezeket nem találták eléggé jellegzetesnek. Ezt nem annyira a cibetmacska biosztátos gyomorhatásának, mint inkább a pörkölés során bekövetkezett illat- és aromaváltozásoknak tulajdonították. Az ízlelési, illetve kóstolási kísérletek is nagyjából hasonló következtetésekre jutottak [19].

Mindenképpen szintén említésre érdemes egy japán kutatás [20], amit a szerzők analitikai kémiai és metabolomikai alapon végeztek a közelmúltban. Valószínűleg nem felesleges itt előbb a metabolomikát definiálni. A metabolomika a metabolitokkal foglalkozó kémiai folyamatok tudományterülete [21], azaz azoknak az egyedi kémiai megjelenéseknek rendszeres vizsgálata, amiket specifikus sejteket érintő folyamatok okoznak. A szerzők ezt a tanulmányt szerintük a világon elsőként annak érdekében készítették, hogy eredményeivel olyan diszkriminatív markereket határozzanak meg, amivel a Kopi Luwak kávébabokat eredményesen azonosíthatják és jellemezhetik a hamisítványokkal szemben.

A különböző metabolitok és markerek mérésére a szerzők főleg tömegspektrometriás gázkromatográfiát használtak, és az értékelést kemometriás, illetve főkomponens-analízissel (PCA), diszkriminancia-analízissel (OPLS-DA) [22] és mikrosorozat metabolitszignifikancia-analízissel (SAM) [23] kombinálva végezték. Három kávétermelési régióból származó 21 (*Coffea arabica* és *Coffea canephora* fajokhoz tartozó) kávéfajtát elemeztek és kemometriásan értékelték. Ennek alapján a citromsavat, az almasavat és az inozitol/piroglutaminsav arányt választották további igazolásra, illetve bizonyították azok alkalmasságát különböző kávéfajták differenciálására. Ezek a markerek megfelelőeknek bizonyultak az eredeti, a hamisított Kopi Luwak, a köznapis kereskedelmi és 50%-os Kopi Luwak keverékkávé-minták differenciális azonosítására. Sőt, a citromsav jelenlétét a Kopi Luwak kávé különleges ízének a magyarázataként is említették.

## Kopi Luwak-szerű kávé előállítása cibetmacska (biosztát) nélkül

Miután a fentiekben leírt ismeretek bőséges anyagot szolgáltatottak a Luwak által gasztrointesztinális (biosztátos) feldolgozású kávé összetételéről és tulajdonságairól, felmerült annak a gondolata, hogy ezt a speciális kávéváltozatot az állat igénybevétele nélkül, *in vitro* eljárással is elő lehetne állítani, illetve olyan technológiát is ki lehetne dolgozni, ami a kávébabok savas és proteolitikus enzimekkel való kezelése során jelentősen *fokozza, illetve megnöveli* a kezelt kávék illatát, ízét, aromáját és zamatát. Ennek érdekében egyesült államokbeli szerzők nagyon részletes, alapos és szerintük eredményes vizsgálatokat végeztek [24], amiknek ismertetésére itt sem hely, sem lehetőség nincs, de hozzá kell tenni, hogy a fenti kutatásokat és szabadalmaztatást egy floridai egyetemen folyó kutatási program keretében valósították meg.

## Kopi Luwak-hasonmások

Mint a közismert mondás állítja, a jó példa ragadós. Ennek jegyében a világ más tájain is elkezdtek előállítani és forgalmazni a luwak-kávéhoz hasonló, méregdrága termékeket [27]. Brazíliában, a változatosság kedvéért, nem cibetmacska, hanem egy ott honos *jacu* nevű madárfajta szintén érett kávébogyókkal is táplálkozik, és potyadékát összeszedve és tisztítva *jacu madár kávéként* forgalmazzák. A Fülöp-Szigeteken honos kávébogyókat faló *alamid* (*Paradoxurus Hermafroditus Philippensis*) cibetmacskafaj megtisztított ürülékéből a Kopi Luwakhoz hasonló *Kape Alamid* luxuskávé állítják elő és forgalmazzák. Ugyancsak forgalmaznak egy Malajziában termelt hasonló kávé *Kopi Muncak* (Kopi Muntjac) néven. Talán a legismertebb és legelterjedtebb hasonmást egy Vietnámban honos, kávébogyókat kedvelő menyétfajta (weasel) végtermékéből állítják elő és *Weasel Coffee* néven forgalmazzák.



A Kape Alamid és a Weasel Coffee kávé

Ez utóbbihoz legenda is párosul, már csak azért is, mert az ily módon készült kávé *Legend Gold* néven forgalmazza egy *Trung Nguyen* nevű vietnami vállalkozó és kávétulajdonos. Valószínűleg szintén a legendához tartozik az a hír is, hogy a vállalkozó 1996-ban megbízott egy német kutatókból álló teamet, hogy tanulmányozzák az állatkában végbemenő biosztatikus jelenségeket és folyamatokat, és ennek alapján kísérleljék meg enzimhatással a különleges kávé *in vitro* reprodukálását. E cikk szerzőjének azonban 17 évvel az említett dátum után sem sikerült semmilyen rögzített leírását felfedeznie a német kutatócsoport eredményeinek. Az azonban valószínűnek tűnik, hogy a vietnami vállalkozó kitűnő üzletember, mert a *Legend Gold* kávé világforgalma túlszárnyalta az indonéz Kopi Luwakét annak ellenére, hogy előbbi kereskedelmi ára elérte a 3000 dollárt.

## Utószó

Mítosz vagy gasztronómiai ínycséség a Kopi Luwak? A válasz mind a két oldalról megközelíthető. Kezdjük talán a mítosz változattal és alkalmazzuk a szó szótári magyarázatát, miszerint „a valóságban meg nem történt nagyszerű események, kitalált történet” [28]. *A Kopi Luwak kávéital eredete az indonéziai ködös homályba vész.*

Az említett alapos kémiai elemzések adatokat szolgáltatottak a biosztatizált (azaz a luwak cibetmacska emésztőrendszerén átment) kávébabok összetételéről, és ezeket összehasonlították a hagyományosan feldolgozott kávébabok összetételével. Mindezek azonban nem, vagy nagyon részrehajlóan magyarázzák, illetve értelmezik a Kopi Luwak gasztronómiai különlegességét. Maradnának a szintén már megemlített, és megfelelő tudományos háttérrel elvégzett érzékszervi (kóstolási) vizsgálatok eredményei. Tényként kell azonban leszögezni, hogy bármelyik, érzékszervre (hallás, tapintás, szaglás, ízlelés) alapozott tudományos vizsgálatot tekintjük, azok eredményeit messzemenően befolyásolhatják az egyéni emberi megítélések és az azokat befolyásoló mítoszok. Ezt két dolgozatunkban az ízlelés, illetve a hallás oldaláról már bemutattuk [29–30]. A második esetben [30] (hallás) azt is leszögeztük, hogy bár a vonatkozó mítoszrombolás létezhet, ennek ellenére a mítoszok fennmaradnak, de általánosan elfogadtatni nem lehet őket. Sajnos, ez jelen esetben is fennáll. Amerikai [15] és kanadai [19] kutatók kidolgozták az állat nélküli, Luwak-szerű, sokkal olcsóbb kávé előállítását, de azt magas áron forgalmazni nem lehet, mert a sznob fogyasztók ragaszkodnak a méregdrága és bizarr állati eredetű termékhez. Ez utóbbinak magyarázatát valószínűleg három újabb fogalom hátterében kell

## Bizarr testközeli biotechnológia

keresnünk. Ezek az exkluzivitás, a luxus és a reklám. Bizonyos, anyagilag jól szituált fogyasztói rétegek főleg Európában, az Egyesült Államokban és Japánban továbbra is vevőként szerepelnek a méregdrága Kopi Luwak luxuskávé piacán. Ehhez még a terméket előállítók rendkívül agresszív reklámhadjárata is hozzájárul. Manapság a fejlett média és az Internet varázserejének akkora hatása az exkluzivitás, a luxusigények vonzerejére és a sznobizmusra, hogy eldöntheti a Kopi Luwak-szerű termék kereskedelmi és felhasználói sorsát.

Befejezésül jelen szerző már csak a közismert mondásra tud hivatkozni: „honni soit qui mal y pense” (rossz az, aki rosszra gondol).

### IRODALOM

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Kopi\\_Luwak](http://en.wikipedia.org/wiki/Kopi_Luwak) (utolsó hozzáférés: 2013. október 9.)
- [2] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Biotechnol%C3%B3gia> (utolsó hozzáférés: 2013 október 11.)
- [3] Sevelle Béla, Biomérnöki műveletek és folyamatok, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2011.
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bioreactor\\_principle\\_sug](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bioreactor_principle_sug) (utolsó hozzáférés: 2013. október 11.)
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/chemostat> (utolsó hozzáférés: 2013. október 11.)
- [6] <http://www.ico.org/botanical.asp> (utolsó hozzáférés: 2013. október 28.)
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Economics\\_of\\_coffee](http://en.wikipedia.org/wiki/Economics_of_coffee) (utolsó hozzáférés: 2013. október 28.)
- [8] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coffee\\_Imported\\_per\\_Country\\_in\\_2005\(USDA\)v2.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coffee_Imported_per_Country_in_2005(USDA)v2.png) (utolsó hozzáférés: 2013. október 28.)
- [9] <http://www.erdekesvilag.hu/a-vilag-legdragabb-kaveja-kopi-luwak/> (utolsó hozzáférés: 2013. október 8.)
- [10] <http://www.economist.com/blogs/prospero/2012/01/coffee-vietnam> (utolsó hozzáférés: 2013. október 8.)
- [11] K. Kleiner, New Scientist, 2004, October 16, 44.
- [12] S. Ponte, The 'LatteRevolution'? Regulation, Markets and Consumption in the Global Coffee Chain [http://my.ewb.ca/site\\_media/static/attachments/threaded-comments\\_threadedcomment/42867/The%20Latte%20Revolution%20-%20Regulation%20markets%20and%20consumption%20in%20the%20global%20coffee%20chain.pdf](http://my.ewb.ca/site_media/static/attachments/threaded-comments_threadedcomment/42867/The%20Latte%20Revolution%20-%20Regulation%20markets%20and%20consumption%20in%20the%20global%20coffee%20chain.pdf) (utolsó hozzáférés: 2013, november 8.)
- [13] [http://www.imreblank.ch/ASIC\\_1991\\_14\\_117.pdf](http://www.imreblank.ch/ASIC_1991_14_117.pdf) (utolsó hozzáférés: 2013. október 25.)
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/Economics\\_of\\_coffee](http://en.wikipedia.org/wiki/Economics_of_coffee) (utolsó hozzáférés: 2013. október 25.)
- [15] <http://www.nacsonline.com/Research/FactSheets/InStoreMerchandise/Pages/Coffee.aspx> (utolsó hozzáférés: 2013. november 8.)
- [16] [http://www.fairtrade.net/fileadmin/user\\_upload/content/290310\\_EN\\_Price\\_and\\_Premium\\_table.pdf](http://www.fairtrade.net/fileadmin/user_upload/content/290310_EN_Price_and_Premium_table.pdf) (utolsó hozzáférés: 2013. november 8.)
- [17] M. Mahendradatta, Zainal, Israyanti, A. B. Tawali, Comparison of chemical characteristics and sensory value between Luwak Coffee and original coffee from Arabica (Coffea arabica L) and Robusta (Coffea canephora L) varieties, The Pharmaceutical Affairs and Food Sanitation Council, 2012, 11, 14. <http://repository.unhas.ac.id/bitstream/handle/123456789/2550/Meta%20Mahendradatta.pdf?sequence=1> (utolsó hozzáférés: 2013 október 29.)
- [18] E. Lamond, Laboratory Methods for Sensory Evaluation of Food, Research Institute, Canada Department of Agriculture, Ottawa.
- [19] M. F. Marcone, Composition and properties of Indonesian palm civet coffee (Kopi Luwak) and Ethiopian civet coffee, Food Research Internat. (2004) 37, 901.
- [20] U. Jumhawan, S. P. Putri, Yusianto, E. Marvani, T. Bamba, E. Fukusaki, Selection of discriminant markers for authentication of Asian palm civet coffee (Kopi Luwak): a metabolomics approach, J. Agricult. Food Chem. (2013) 61, 7994.
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/Metabolomics> (utolsó hozzáférés: 2013. november 5.)
- [22] S. Wilund, E. Johansson, L. Sjöström, E. J. Mellerowicz, U. Edlund, J. P. Shokor, J. Gottfries, T. Moritz, J. Trygg, Visualisation of GC/TOF-MS-based metabolomics data for identification of biochemically interesting compounds using OPLS class models, Anal. Chem. (2008) 80, 115.
- [23] V. G. Tusher, R. Tibshirani, G. Chu, Significance analysis of microarrays applied to the ionizing radiation response, Proc. Natl. Acad. Sci. USA (2001) 98, 5116.
- [24] L. F. Marcone, Quality enhancement of coffee with acid and enzyme treatment. A thesis presented to the Graduate School of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master Science, University of Florida, 2007.
- [25] Patent application title: Quality enhancement of coffee beans by acid and enzyme treatment. Inventors: L. F. Marcone, M. O. Balaban, (PC8 Class, AA23F502F1) USPC Class: 426 45, Publication date: 2009-09-03, Patent application number: 20090220645
- [26] <http://www.reeis-usda.gov/web/crisprojectpages/0202321-quality-enhancement-of-coffeebeans-byacid-and-enzyme-treatment.html> (utolsó hozzáférés: 2013. november 5.)
- [27] <http://www.realkopiluwak.com/urban-myth/>
- [28] Bakos Ferenc, Idegen szavak és kifejezések szótára, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002.
- [29] Braun Tibor, Gasztronómiai íz-, illet-, és zamat-párosítások molekuláris háttere és lehetőségei, Magy. Kém. Lapja, (2014) 69, 347.
- [30] Braun Tibor, Mítoszrombolás hegedűvel. a Stradivari hangszerek akusztikai, kémiai és biotechnológiai jellemzése, Magy. Kém. Lapja (2013) 68, 230.



# A DNS leképezése vízben: valóság vagy patológiás tudomány?

## Haditudósítás egy vitatott kutatási téma frontvonaláról\*

### Előszó

Nem kevés gondot okoz a szerzőknek, ha olyan területre tévednek, amelyet hajszálvékony sáv választ el a patológiás tudománytól. A tudományos kutatás szakirodalmában „patológiás tudomány”-nak nevezi azt a folyamatot, amelyben „kutatók belekeverednek hamis eredmények kinyilatkozásába – szubjektív effektusok, vágyálmok, illetve ábrándozások hatására”. [1] Úgy tűnik, hogy a kifejezést *Irving Langmuir* Nobel-díjas fizikus használta először a Knolls Research Laboratóriumban 1953-ban tartott előadásában. Ő ott azt hangsúlyozta, hogy a patológiás tudomány az „a tudomány, amelyben egyszerűen a tények nem olyanok, mint amilyenek” (*the science of things that aren't so*). [2] A témával behatóbban foglalkozik *Robert L. Park* fizikus nemrégien megjelent könyve, amelyben patológiásnak nevezi azt a tudományt, „amiben valódi kutatók önmagukat ámitják” (*pathological science, where ingenuine scientists deceive themselves*). [3] Ilyenkor nem csekély a rizikója annak, hogy a szerzők a téma körüli ködben akaratlanul átlépik a nem túl szigorúan meghúzott határvonalakat. Emellett azt is el kell ismernünk, hogy ebben a dolgozatban az ádáz küzdelem, haditudósítás, frontvonal szavak enyhén szólva szokatlanok és feltétlenül magyarázatra szorulnak. Ehhez az egyik út az, hogy igénybe vesszük *Robert Merton*, [4, 5] talán a valaha élt legjelentősebb tudományszociológus nézeteit, miszerint a versengés a tudományban, illetve a kutatásban a fejlődés egyik legjelentősebb velejárója. Mint ahogy annak velejárója az eredetiség és a prioritás is. [6] Egy felfedezés, illetve az elért eredmény tulajdonjogát és elfogadását a kutatók természetesen saját maguknak igyekeznek vindikálni minden morális és anyagi előnyeivel együtt. Bár, mint említettük, a fentiekben a versengés a kulcsszó, azonban amikor egészen különleges elismerések, mint a Nobel-díj, vagy a kutatásokat finanszírozó anyagiak is felmerülnek, a versengés helyett már a harc, csata vagy küzdelem fogalma is felmerül. Nagyon ékesszólóan és meggyőzően kísérelte meg a fentieket idősebb *Pieter Bruegel* (16. század) *The battle for Mammon* című fametszetének enyhe átalakításával ábrázolni *Paul Ribbe* egyesült államokbeli kutató. A *mammon* szó a pénz arameus, 1. századbeli szemita nyelvi megfelelője és *Ribbe* [7] az ezekért a javakért folyó küzdelmet, illetve harcot ábrázolta Bruegel fametszetén (1. ábra) úgy, hogy a középkori harcosok vértjén a nagy amerikai egyetemek, illetve intézmények neveit tüntette fel, ezzel próbálva érzékeltetni azt az ádáz harcot, amit ezek a pénzbeli javakért (kutatási támogatásért) nap mint nap folytatnak! Hogy az ábra még inkább tükrözze a helyzetet, *Ribbe* *Hobbes* véleményével is megtoldotta, miszerint „minden időben a kutatók elképzelt önállóságuk okán és állandó irigység folytán gladiátor-helyzetben fegyvereiket és gyanakvó pillantásukat egymásra szegezve háborús képzetben élnek”. [8] Sokak szerint az, ami manapság e téren történik, már meghaladja a tudomány fejlődése szempontjából hasznos versengés mértékét. [9,10]

Jelen munkában röviden elemezni kívánjuk *Luc Montagnier* francia kutató Nobel-díj előtti, majd részletesen az utáni, a tiszta víz inframikrobiológiai molekuláris leképzési tulajdonságaival kapcsolatos kutatásait, eredményeit, azok fogadását és hatását.

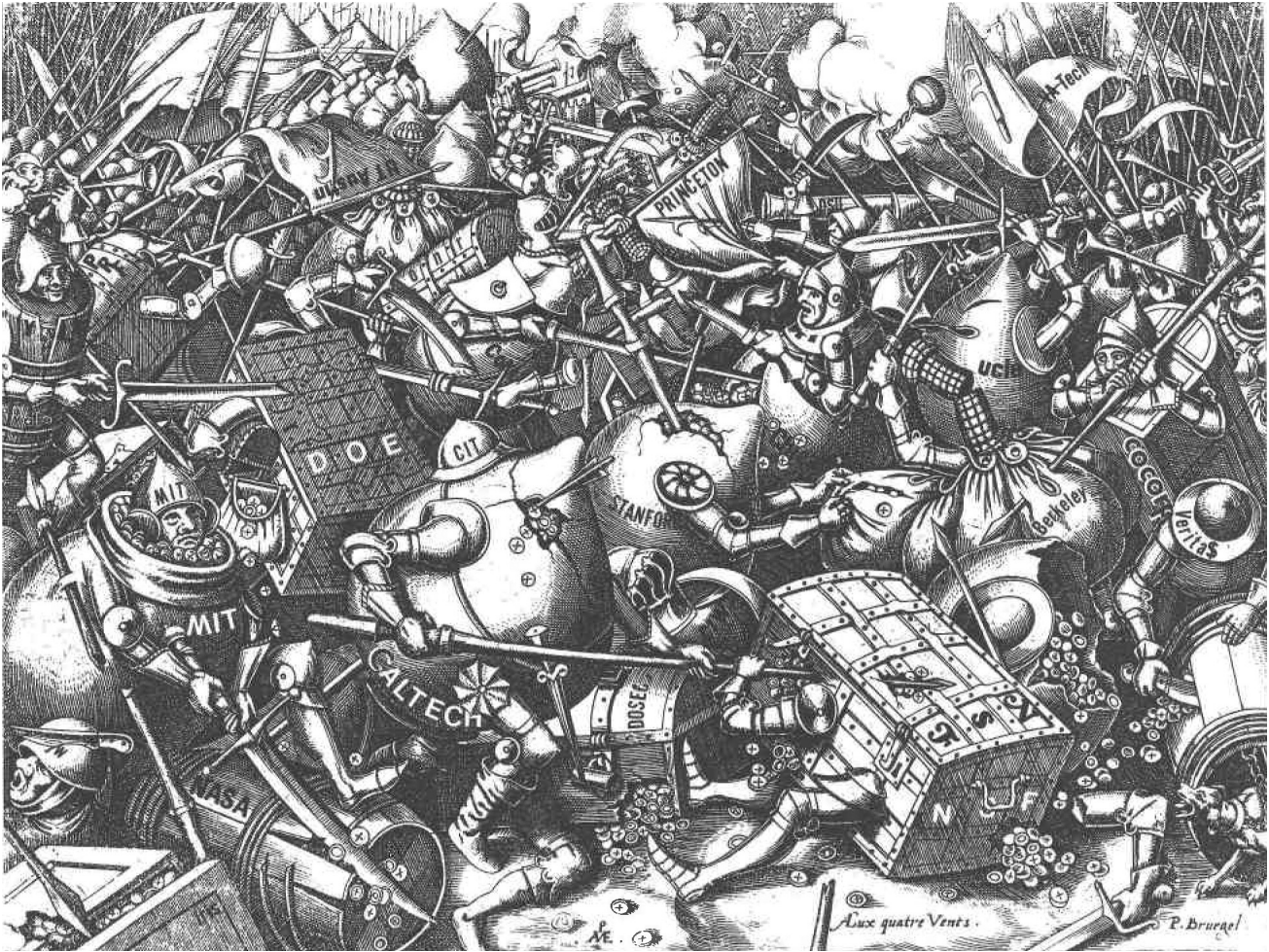
A következőkben összefoglaljuk *Luc Montagnier* útját, illetve ugyancsak ádáz harcait a Nobel-díjig, bár úgy találtuk, hogy annak részletei már világszerte közismertek a megjelent íráskor nyomán [11–13], és köztudott, hogy a történet happy enddel zárult (Nobel-díj). Viszont kifejezetten a harcokra és azok részleteire kívánunk itt kitérni, amelyek megkísérelnének fényt vetni egy olyan, folyamatosan harcban álló kutató cselekvéseire, mint *Montagnier*. Mivel mindezek a küzdelmek, viták, harcok, csaták a tudományos kutatás jegyében zajlottak, annak legelőrehaladottabb kutatási frontján, teljesen jogosnak és indokoltnak látjuk, hogy elemzésünket haditudósításnak nevezzük és annak megfelelően mutassuk be.

### Bevezetés

A tudományos „jutalomrendszer” egyik legismertebb megjelenési formáját a tudományos díjak jelentik. A történelem folyamán a tudományos teljesítmény jutalmazására számos díjat hoztak létre és – az esetek többségében „meritokratikusan” – adományoztak olyan kutatóknak, akiket a díjak létrehozói arra alkalmasnak találtak. A körülmények rendkívül szövevényes alakulása következtében azonban egy díj egészen különleges tekintélyre tett szert, a tudományos díjak díjává, minden kutató elérhetetlennek hitt álmává, a tudomány Walhallájába való bejutás küszöbévé a tudományos teljesítmény örökös elismerésének szimbólumává vált.

\* Magyar Kémikusok Lapjában megjelent cikk társszerzője Nemes László (MTA Természettudományi Központ).





1. ábra. Harc a mammonért. Enyhén módosítva idősebb Pieter Bruegel fametszete nyomán (1563) [3]

Ez a díj az Alfred Nobel svéd feltaláló által 1900-ban alapított és 1901-ben először kiosztott Nobel-díj, amely külön-külön a fizikában, a kémiában, valamint az élettudományok (fiziológia és orvostudomány) területén elért kimagasló kutatási teljesítményeket honorálja. A Nobel-díjnak, keletkezésének, működésének, eddigi történelmének jelentős szakirodalma van, érdeklődő inyceneknek figyelmébe ajánlhatók Hargittai István [14] és Harriet Zuckerman [15] kiváló monográfiái, de talán a díjátadások ünnepléességét ismertető mű is. [16]

Sajnos e díj elérése körüli versengés nem kevés vonatkozása azonosítható a fenti előszóban említett küzdelemmel, az 1. ábra mondanójával, illetve a Hobbes-féle idézettel. [7]

## A HIV vírus és az AIDS

A Human Immunodeficiency Virus (magyarul: emberi immunhiányt előidéző vírus) embert fertőző vírus, az AIDS nevű betegség kórokozója. [17]

„Az 1980-as évek elején az USA-ban Los Angeles, San Francisco városaiban fiatal homoszexuális férfiak között rejtélyes megbetegedéseket fedeztek fel az orvosok: olyan kórok jelentkeztek, melyek egészséges immunrendszer mellett nem okozhatnának betegséget. Kiderült, hogy valami pusztítja az immunrendszerüket, gyakorlatilag védtelenné válnak mindenféle banális fertőzéssel szemben. 1983–1984-re kiderült, hogy egy retrovírus áll a háttérben, amely megtámadja az immunrendszer T4 helper sejtjeit – későbbi kutatások során bebizonyosodott, hogy valamennyi olyan sejthez képes kötődni, amely tartalmazza az úgynevezett CS4+-os receptort (CD4 sejtmembrán-fehérjét tartalmazó sejtek), ilyen sejtből pedig nagyon sok típus van az emberi szervezetben.

E retrovírus felfedezése egymástól függetlenül két kutató nevéhez fűződik, ők: Luc Montagnier [18] – Párizs, és Robert Gallo [19] – Egyesült Államok. Az első elnevezés LAV, illetve HTLV-III volt (a HTLLV-I és II régebb óta ismert leukémiavírusok). A betegség is új nevet kapott: Szerzett Immunhiányos Tünetegyüttes (*Acquired ImmunoDeficiency Syndrome*) (1982). [20]

Bár a HIV vírus felfedezése, mint a bevezetőben is már utaltunk rá, nem tartozik közvetlenül ennek az írásnak a tárgyköréhez, feltétlenül meg kell említenünk, hogy az ezt megelőző mondatban a kiemelt „függetlenül” szót hivatkozott forrásunk [17] tévesen említi. Ennek oka kiderül majd a továbbiakban.

## Montaigner első csatája

„1983-ban és 84-ben vita alakult ki az amerikai Gallo- és a francia Montagnier-laboratórium által használt metodikák kapcsán. A Montagnier-laboratórium 1983 májusában nyilvánossá tett egy cikket HIV-kutatásairól, és annak bírálója Gallo volt, aki azt saját összefoglalóval egészítette ki. Ezt szerinte azért tette, mert a HIV- járványt megelőzően Gallo laboratóriuma felfedezte az I típusú humán limfocita vírust (HTLV-I), és ez olyan retrovírus, aminek a csoportjába a HIV-et is sorolták. 2008-ban a fiziológiai és orvostudományi Nobel-díjat az AIDS, illetve a HIV vírus felfedezéséért ítélték oda, 25 évvel az első olyan közlemények megjelenése után, amelyek a vírus és az AIDS közötti okozati kapcsolatot leírták. Gallo esetében azonban több tényező is kérdésessé tette a Nobel-díjra való jelölést. Elsősorban azért, mert – mint említésre került – Gallo összefoglalót csatolt Montagnier cikkéhez, és helytelenül úgy állította be, hogy az újonnan felfedezett vírus ugyanaz, mint a HTLV-I. Montagnier azt állította, hogy az ő laboratóriumában meghatározott vírusok mások voltak. Másodsorban Gallo Montagniertől HIV vírushmintákat kapott, de azt állította, ismét helytelenül, hogy az általa talált vírus más volt, mint amit a mintában kapott. Utólag derült ki, hogy a vírusok azonosak voltak.

Gallo megnyilvánulásai maguk után vontak a National Institute of Health (NIH) etikai viselkedési bizottságának vizsgálatát. Montagnier eredeti közleménye szerényen azt állította, hogy „a (felfedezett) vírus szerepe az AIDS etiológiájában még tisztázásra vár”. Egy évre rá Gallo négy, *Science* folyóiratban publikált cikkben jellemezni tudta a vírust, de a NIH-bizottság még mindig úgy találta, hogy kutatásai nem voltak egyenrangúak Montagnier-éival. Mindezekon túlmenően az időközben Gallo és Montagnier által kidolgozott, a HIV vírust azonosító vérvizsgáló teszt tulajdonjoga is vitaként robbant ki kettőjük között, ami több előzmény után arra készítette Reagan amerikai elnököt és Jacques Chirac francia miniszterelnököt, hogy „együtt-felfedezőnek” nyilvánítsák kettőjüket. Annak ellenére, hogy Gallo és Montagnier ekkor már ennek megfelelően szerepeltek, a Nobel-bizottság csak Montagnier-nek és Françoise Barré-Sinoussinak ítélte a HIV vírus felfedezéséért és elválasztásáért a 2008-as fiziológiai és orvostudományi Nobel-díj felét. A másik felét a német Harald zur Hansennek szavazták meg a méhnyakrákot okozó humán papilloma vírusok felfedezéséért. Annak ellenére, hogy Gallo alapján véve részt vett a HIV és az AIDS kapcsolatának a felderítésében, és mindketten osztoztak a HIV-érvizsgálat szabadalmának tulajdonjogán, a Nobel-bizottság Gallo arroganciáját és erőteljes sikerkövetelményeit elítélendőnek találta, és Gallót ezért érdemtelennek ítélte a Nobel-díjra.

A fentiekhez hozzá kell tenni, hogy Gallo ugyan, mint már említettük, 1983 előtt felfedezett két olyan vírust, amelyeket HTLV-I-nek és HTLV-II-nek nevezett, és ritka vérrákot okoznak, de a Montagnier-val való vita során 1983 decemberében publikált egy cikket, ami szerint egy új vírust fedezett fel, és ezt HTLV-III-nak nevezte el. Ennek hatására 1984. április 23-án Margaret Neckler, az Egyesült Államok egészségügyi minisztere a világsajtóban közzétette, hogy Gallo azonosította az AIDS-t okozó vírust, amit HTLV-III-nak neveztek el, és azt is hozzátette, hogy rövidesen elérhető lesz egy kereskedelmiileg mindenki számára hozzáférhető teszt a vírus kimutatására. A francia hatóságok erre rögtön dühös tiltakozó kommunikéval és perrel reagáltak. Ez persze nem csak nemzeti büszkeség kérdése volt. Ugyanis több százmillió dolláros jogdíjat is érintett a HIV-víruseszt szabadalmi jogainak kapcsán. A franciák viszonzásképpen ismételték azt állították, hogy Gallo ellopta a vírusukat. Számos oknyomozó újságcikk egyetértett a Gallo elleni vádakkal. Végül az amerikai National Institute of Health egy tanulmánya hasonló következtetésre jutott.

A vita (harc) utóhatása hivatalosan csak 1987-ben ért véget, amikor az Egyesült Államok elnöke és a francia miniszterelnök, mint említettük, közös közleményben azt nyilatkozta, hogy Gallo és Montagnier osztozik a felfedezésen és a két kormány osztozik a HIV-víruseszt szabadalmi jogdíján. Úgy tűnik, hogy tudományos vitákkal, csatákkal kapcsolatos kérdések soha addig nem folytak és dőltek el ennyire magas politikai szinten. [21]

## Montagnier a Nobel-díj után

A Nobel-díjak rendkívüli tudományos és társadalmi jelentősége folytán magát a tudományos kutatási közösséget, de a médiát és az érdeklődő nagyközönséget is foglalkoztatják az olyan kérdések, hogy hogyan folytatják szakmai és magánéletüket a Nobel-díj díjazottjai a díj után. A kérdésnek jelentős irodalma áll rendelkezésre, talán ebből elég itt csak kettőt említenünk. [22,23]

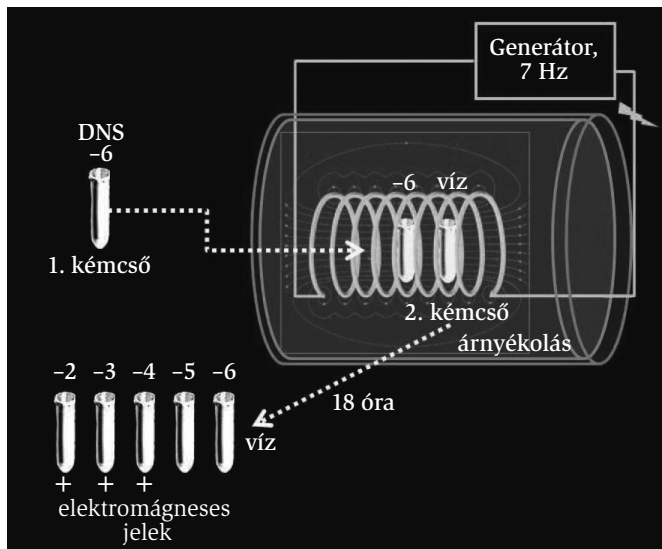
Montagnier 76 éves korában kapta meg a díjat. Ez a kor már önmagában is indokoltá teheti a győzedelmes visszavonulást vagy általános társadalmi tevékenységet élvezve a megbecsülés és tisztelet örömteli meglétét. Montagnier-val nem ez történt. Feltételezhetően előző kutatásai és megmaradó nyughatatlan harcos kutatói érdeklődése által stimulálva folytatta vizsgálódásait, amelyek ugyan rokonságban maradtak az előző tématerületével, az AIDS és HIV víruskutatással, de jelentős lelkesedéssel egy merőben újnak is nevezhető terület kutatásába kezdett.

## A DNS és a vírusok lenyomata, illetve távleképzése vízben elektromágneses hullámokkal

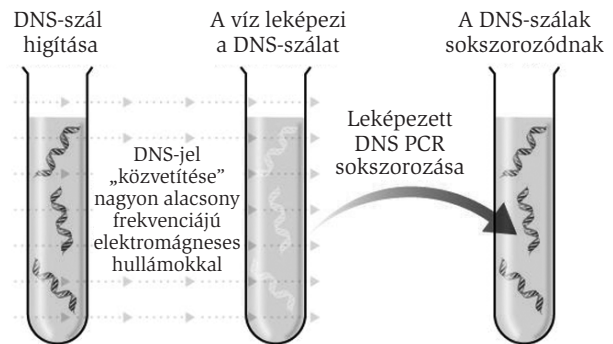
Új kutatási eredményeiről Montagnier 2009-ben eredeti cikket publikált egy Kínában létesített nemzetközi tudományos folyóiratban. [24] A folyóirat alapításában ő maga is részt vett, mint a szerkesztőbizottság elnöke, és eredményeit a nemzetközi arXiv depozitóriumban megjelent közleményben is közzétette. [25] Ez utóbbi cikk 2011-ben egy fizikai folyóiratban is megjelent. [25] 2009 és 2013 között Montagnier a témáról újabb eredményeket nem publikált. Ezzel szemben a francia, sőt az egész világ tudományos közvéleményét meglepetésként érte a hír, hogy 2010-ben, 78 éves korában Montagnier elvállalta a sanghaji Jiaotong Egyetemen az új kutatási témájával foglalkozó, kimondottan számára létesített és a nevét viselő kutatóintézet vezetését annak ér-



## DNS leképezése vízben: valóság vagy patológia tudomány?



2. ábra. Montagnier DNS-leképezési kísérlete tiszta vízben [26]



3. ábra. A DNS leképezése [25]

dekében, hogy a fent említett cikkekben leírt felfedezését még alaposabb tanulmányozás és bizonyítás tárgyává tegye. Ezekben a cikkekben Montagnier azt állítja, hogy kísérletileg igazolni tudta, hogy a DNS-molekula elektromágneses hullámok hatására lenyomatot tud küldeni saját magáról tiszta vízbe és a PCR (polimeráz láncreakció) a lenyomatokat össze tudja tévesztetni a valódi DNS-sel úgy, hogy azt pontosan reprodukálja. A kísérlethez használt berendezés a **2. ábrán** látható. „Két egymás melletti, de jól elválasztott kémcsövet (mint az ábrán látható) réztekercsbe helyeztek, és azokat 7 Herz frekvenciájú, nagyon gyenge elektromágneses sugárzásnak tették ki. A készüléket (a réztekercsrel) a Föld természetes mágneses terétől elszigetelték. Az egyik kémcső egy körülbelül 100 bázisból álló DNS-fragmens vizes oldatát, a másik tiszta vizet tartalmazott. 16–18 óra állás után mindkét kémcsőben elvégezték a PCR reakciót. [27, 28] A DNS-fragmens mindkét kémcsőben kimutatható volt annak ellenére, hogy eredetileg az egyik kémcső csak tiszta vizet tartalmazott (**3. ábra**). Ellenben a DNS csak akkor képződött le, ha az eredetileg nem megadott koncentrációjú DNS-t tartalmazó oldatot a mágneses térbe helyezése előtt többszöri hígításnak tették ki, és a „szellem DNS” csak 7 és 12-szeres hígítás után jelentkezett. Hangsúlyozták, hogy a leképezés nem jött létre a homeopátiában használt ultranagy hígításoknál. Montagnier és munkatársai azt sugallták, hogy a leképezés megmaradása és amplifikálása a kvantumkoherencia hatásának tulajdonítható. [24, 25]

A fentiekben túlmenően Montagnier azt is leírta, [24,25] hogy felfedezte, hogy nemcsak DNS-fragmentumok, hanem teljes baktériumok is képesek gyenge elektromágneses tereket létrehozni, sőt saját magukat „regenerálni” előzőleg fertőzetlen sejtekben. Ehhez *Mycoplasma pirum* baktériumokat 450 nm és 20 nm méretű pórusos szűrőkön szűrt a baktériumok távoltartására. A le-szűrt oldat elektromágneses sugárzása viszont a **4. ábrán** bemutatott készüléken kimutatható volt, azaz az eredeti baktérium-oldathoz hasonló frekvenciájú elektromágneses jelet bocsátott ki. Ugyanezt a jelenséget több más baktériumfajta, sőt vírusok is mutatták, de még kóros emberi sejtek is.

### Montagnier DNS-leképzési kutatásainak nemzetközi fogadtatása (vegyes pozícióharc)

A haditudósító arról tudósít, amit a kutatási hadszíntéren lát és tapasztal, illetve feldolgozza azokat az információkat, amelyek a frontvonalon létrejöttek és amelyekhez a tudósító hozzájuthat. Ebben a vonatkozásban az hangsúlyozandó, hogy Montagnier új eredményei és azok értelmezése a médiában meglehetősen vegyes nemzetközi fogadtatásra találtak. 2011-ben a jelentős tekintélyű angol folyóirat, a *New Scientist* több ismert kutató véleményét kérte ezekről. [26] „Az Atlantai (Egyesült Államok) Egyetemen a DNS vezetőképességét tanulmányozó Gary Schuster Montagnier eredményeit patológia tudománynak nyilvánította.



Luc Montagnier



Robert Gallo

Jacqueline Barton, aki hasonló vizsgálatokat folytat a pasadenai California Institute of Technologyn, szintén szkeptikus volt. „Nem sok adatot adtak meg és nem fogadom el a magyarázatukat sem” – nyilatkozta. Greg Scholes, a Torontói Egyetem kutatója, aki 2010-ben kvantumhatárok meglétét mutatta ki növényekben, úgy vélte, hogy „bár [Montagnier] biológiai kísérletei fejtörést okoznak, nem vetné el őket.” A bochumi Ruhr Egyetemen a víz és biomolekulák közötti kölcsönhatásokat tanulmányozó Klaus Gerwert szerint „nehéz megérteni, hogyan tud a víz információt tárolni egy pikoszekundumnál hosszabb ideig”. „A szerkezet rögtön megsemmisül” – ért egyet ezzel egy visszavonult londoni kutatóvegyész. A *New Scientist* cikkének szerzője úgy érzi, hogy a Montagnier értelmezéseit övező szkepticizmus ellenére az eredmények megérdemlik a további vizsgálatokat. Giuseppe Vitello, Montagnier kollégája, a Salernói Egyetem fizikusa azt állítja, ahhoz, hogy az eredmények megbízhatóak legyenek, „én kizárnám az esetleges szennyezettséget” és „nagyon fontosnak tartom, hogy más csoportok reprodukálják azokat”. Jeff Reimers, a Sydneyi Egyetem elméleti kémikusa azt nyilatkozta, hogy „amennyiben az eredmények helyesek, ezek lennének az utóbbi 90 év során végzett legeredményesebb kísérletek, amelyek maguk után vonnák a modern kémia teljes konceptuális struktúrájának újjáértékelését”. [29] „Nem a lehetséges kvantumhatás, azaz a DNS látszólagos leképezése vízben a kísérletek legvitatottabb eleme, hanem a jelenség relatíve hosszú időtartama. Kvantumjelenségek feltételezhetően a szekundumok érzékelhetetlen töredékeiben jelennek meg, és nem maradnak meg másodpercekig, percekig, vagy órákig, és általában csak az abszolút nullát megközelítő hőmérsékleten lépnek fel. Montagnier kísérleteit másoknak is meg kellene ismételniük szobahőmérsékleten ahhoz, hogy azokat komolyan vegyék. Mindaddig (2011. január 13.) számos kutató nyilvánosan hitetlennek bizonyult.”

## Előzmények, illetve támogató megnyilvánulások

Valószínűleg Montagnier hibáján kívül, de DNS-leképezési kísérleteinek és azok nemzetközi fogadtatásának két olyan velejárója is akadt, amelyek ugyancsak jelentős negatív hatást váltottak ki. Az egyik, a Jacques Benveniste-ügy [31] talán nem is annyira velejárónak, mint inkább előzménynek tekinthető. „Benveniste 1998-ban egy jelentős nemzetközi nézeteltérés központjává vált, amikor a hírneves *Nature* folyóiratban cikket publikált, amiben leírta nagyon nagy hígítású anti-IgE antitestek hatását humán bazofilek degranulációjára. Ezek az eredmények a szintén vitatott [32] homeopátia [33] alátámasztásának tűntek. Biológusok és mások is tanácstalanok voltak Benveniste eredményei láttán, mert a nagy hígítások után csak vízmolekulák, de nem az eredeti antitestmolekulák maradtak a vízben. Egy újságíró a Benveniste-hipotézisre kreálta annak idején a „víz memóriája” kifejezést. Jóval később Benveniste azt állította, hogy ez a „memória” digitalizálható, közvetíthető és átvihetően újjáképezhető egy másik vízminőségben, aminek az első mintával hasonló tulajdonságai lesznek”. [31] A „vízmemória”-hipotézis később reprodukálhatatlannak és tudományosan megalapozatlannak bizonyult. [34, 35]

A homeopátia apostolainak médiában való megnyilvánulása szintén negatív árnyékot vetett Montagnier kísérleteire. Ezek úgy vélték, bizonyítást lelnek Montagnier-nél a homeopátia igazának tudományos voltára. [36, 37] A Montagnier-kísérletek eredményeit a tudományos világ a tudomány addigi fizikai, kémiai és biológiai ismeretanyagának ellentmondó jellegük miatt kérdőjelezte meg, illetve találta hiteltelennek. [26] Ezek után feltétlenül említésre érdemes egy olyan megnyilvánulás, [38] ami magukat a cikkeket, [24, 25] illetve az azokban alkalmazott módszereket és berendezéseket is kritikus aprólékossággal elemzi és jelentős hitetlenséggel fogadja. Ez utóbbi, 2011. január 24-én publikált elemzésben a szerző (P. Z. Myers) azzal a lehangolóan negatív véleményével kezd, miszerint „it almost makes me disbelieve that HIV causes AIDS” [38] (csaknem arra késztem, hogy ne higgyem el, hogy a HIV okozza az AIDS-t).



## A Montagnier-cikkek idézettsége

Mint említettük, Montagnier vizsgálatairól a fenti negatív vélemények a médiában láttak napvilágot. Mindenképpen szükségesnek látszott azt is bizonyos elemzés tárgyává tenni, hogy a tudományos folyóiratokban idézték-e és hogyan Montagnier cikkeit. [24, 25] Érdekes módon nem sikerült olyan folyóiratcikket sem találni a 2009 és 2013 közötti időszakban, ami a Montagnier-kísérletek reprodukálásával, illetve a reprodukálás sikerével vagy sikertelenségével foglalkozott volna. Számos Montagnier-t idéző cikk foglalkozott viszont a tiszta víz bizonyos körülmények közötti viselkedésével, illetve szerkezetével. Ezek közül a következőkben bemutatunk néhányat. „Senki sem érti igazán a vizet. Zavarba ejtő annak elismerése, hogy az az anyag, amely bolygónk kétharmadát borítja, még mindig rejtélyt képez. Minél alaposabban vizsgáljuk, annál több kérdés merül fel: az új technikák, amelyek a folyékony víz molekuláris felépítését szondázzák, újabb rejtélyeket vetnek fel.” Számos biológiai jelenség járult hozzá ehhez a rejtélyhez. [38]

Említett szerzők a Montagnier-cikk [24] mellett egy, a víz szerkezetével foglalkozó 2008-beli *Nature*-cikket is idéznek, aminek szerzője a víz témáról a következőt állítja: „Egy vitatott cikk, amelyet a Stockholmi Egyetemről publikáltak a *Science*-ben, [40] azt állítja, hogy a folyékony víz molekulái két másikhoz kötődnek, láncokat és gyűrűket képezve. A fentiekhez kapcsolódik a hír, hogy P. Ball, a *Nature*-cikk szerzője 2013-ban visszatért a Montagnier-féle vizsgálatokhoz, állítva, hogy „it looks like one of the most astonishing discoveries in a century, yet it was almost entirely ignored”. [41] „Továbbá, nemrég Luc Montagnier világította meg, hogy a szűrés fontos a »vizes nanoszerkezetek« esetében. ... A víz tanulmányozása során felfedezett tulajdonságok nem értelmezhetők a klasszikus termodinamika és kvantummechanika keretei között. Azonban az egyensúlytól távoli rendszerek termodinamikája [42–44] és a koherens kvantumelektrodinamika [45, 46] új utakat nyithatna meg ezeknek az új eredményeknek a megértéséhez.” [47] „Nemrég Montagnier [24] világított rá a szűrés vizes nanoszerkezetekre gyakorolt hatására.” [47, 48]

Meghallgatásra talál az ötlet, miszerint a víz – mint önszervező rendszer – a különböző mechanikai és/vagy elektromágneses perturbációkra egyensúlytól távoli szerkezetek képzésével válaszol.

„A víz és a vizes oldatokkal foglalkozó cikkek növekvő mértékben jelennek meg a tudományos szakirodalomban. Ezek a nagyon nagy hígtású oldatoknál kimutatták [24] a tiszta víz rendkívüli tulajdonságait. A tanulmányozott elegy olyan nemegyensúlyi rendszer, amiben irreverzibilis folyamatok játszódnak le. A vizes rendszerekre vonatkozó, teljesen új kutatási terület drasztikusan új lehetőségekre mutat, amelyekben a folyékony víz szupramolekuláris szerkezete mechanikus perturbációnak, illetve nagyon kis térfogatra való korlátozásnak van kitéve. Ez utóbbi tulajdonság kapcsolatban lehet a biológiai sejtekben tartalmazott víz különleges tulajdonságaival.” [49]

„Hipotézisünk szerint az extrém híg oldatok partikuláris előállítási technikája (interaktív hígtások) az oldószer (víz) megváltozásához vezethet disszipatív szerkezetek [24, 42] képződésével.” [50] A kvantumtérelmélet (QFT) keretében végzett elméleti elemzések újabban következetes kvalitatív magyarázatot nyújtottak a fentebb említett rövid idejű hatásokra és a DNS-információ leképezésére, amelyeket szukcesszíve hígtott folyadékmintákban [24, 46] (Very Low Molarity Repetitive Succesive Diluted Liquids, VLMSDL) mértek.” [46]

„Montagnier a bakteriális DNS-szekvenciák új tulajdonságáról számolt be, azaz arról a képességükről, hogy rezonáns elektromágneses hullámokat bocsátanak ki külső, nagyon alacsony frekvenciájú elektromágneses gerjesztés után. Az elektromágneses jeleket és a nanoszerkezetet fenntartó rezonancia fizikai természete még meghatározásra vár, úgyszintén a források, specifikus hullámhosszak, valamint az elektromágneses jelek amplitúdója és időtartama.” [51]

„A biológiai dinamika elektromágneses természetének közvetlen megerősítését és a víz által játszott központi szerepet erősítette meg nemrég egy Montagnier [24, 25] által vezetett kutatócsoport.” [52]

„Ami a biológiai jelek elektromágneses természetét illeti, az olvasót Montagnier közelmúltbeli eredményeihez [24, 25] irányítjuk, aki leírta, hogy bizonyos bakteriális DNS-szekvenciák képesek elektromágneses hullámok kiváltására nagy hígtású vizes oldatokban. Meg kell jegyeznünk, hogy az elektromágneses jelek detektálására a Montagnier kísérleteiben használt fizikai módszer (szűretlen szolenoid tekercs) nagyon hajlamos technogén elektromágneses zaj miatti hibák keltésére.” [53]

## Montagnier álláspontja a fenti megnyilvánulások után

Mindenképpen korrektnek és hasznosnak tartottuk, hogy a frontvonal másik oldaláról nézve is kiegészítsük a haditudósítást. Ezt úgy véltük a legcélszerűbbnek, hogy megemlítsük Montagnier egy 2012-ben publikált hosszabb magyarázatát, amiben eredményeit és azok konkrét orvosi alkalmazását is, például az autizmus területén, részletesen elemzi. [54] Ehhez hozzá kell tenni, hogy az orvosi alkalmazások elemzése nem tartozik jelen haditudósítás tárgyához. Jelentősen sokatmondóbbnak véltük egy olyan interjú megemlékését, amit Montagnier adott 2010-ben a *Science* folyóirat egyik szerkesztőjének. [55]

## Zárószó, illetve tájkép csata után

A zárószó kapcsán nem vitás, hogy a haditudósítás befejezését valószínűleg illendő lehet tájképként vázolni. Ennek azonban akadálya, hogy jelen dolgozat témáját távolról sem lehet még csata utáninak tekinteni.

A csata még dúl, és Montagnier a maga igazát és annak bizonyítékait keresve vívja kínai intézetében és a „peer”-ek elismerésében. A jelen helyzetet (2013. december) ezért talán szintén haditudósítói szemmel valószínűleg fegyverszünetként jellemezhetnénk, körvonalazva, hogy mi látható, tapasztalható a frontvonal két (ellentétes) oldalán.

## DNS leképezése vízben: valóság vagy patológiás tudomány?

Ami a tudósító szemében feltétlenül hiányosságnak tűnik, az, hogy a szakirodalomban nem volt fellelhető egyetlen olyan publikált dolgozat sem, ami megkísérelte volna reprodukálni Montagnier – például a 3. ábrán vázolt – kísérletét. Kétkedő, illetve megkérdőjelező vélemények, amelyekből jelen dolgozatban idéztünk is, vannak, de ezek sem a reprodukálhatatlanságra támaszkodnak, hanem a tudományos ismeretek jelen állása szerint a hihetatlenségre és a valószínűtlenségre építenek. De persze meg kell említeni azokat a véleményeket is, amelyek további vizsgálatok szükségességét hangsúlyozzák elutasítás helyett.

Montagnier frontvonaláról nézve számára negatív tájképet ábrázol a *Science*-nek adott interjú, illetve annak néhány állítása. Azok sajnos az e dolgozat elején említett Langmuir-, illetve Park-féle szemléletet látszanak igazolni, ami szerint „there are things that aren't so”, illetve „where genuine scientists deceive themselves”. És akárhogy nézzük is, ez sajnos a „patológiás tudomány” egy (szelídebb) fajtája. Már amennyire Montagnier azokhoz tartozik, akik Langmuir [2] szerint „belekeverednek hamis eredmények kinyilatkozásába – szubjektív effektusok, vágyálmok, illetve ábrándozások hatására.”

A Montagnier-cikkek idézettsége, illetve az idéző cikkek, mint láttuk, nem annyira a leképezéssel foglalkoznak, hanem a víz szerkezetével, mint a leképezés közegével. És nem lehet kizárni, hogy a víz szerkezete itt a kulcskérdés, illetve az, amit *Philip Ball* arról 2008-ban ír: „water, an enduring mystery”. [39]

A fenti tárgyaláshoz szeretnénk néhány kiegészítő megjegyzést fűzni, amely saját álláspontunkat is tükrözi. Ezek célja az, hogy elkerüljük az olvasóban annak a benyomásnak a kialakulását, miszerint olyan értelemben „tárgyilagoss” a témakör ismertetése, hogy egyforma súlyt ad Montagnier „eredményei” valóságosságának, illetve megkérdőjelezhetőségének. Természetesen szükség van arra, hogy független kutatók a kísérletek megismétlésével igazolják, vagy kétségbe vonják Montagnier és szerzőtársai állításait. Ez a tudományos kutatás alapszabálya. Erre tehát a végső vélemény kialakítása előtt szükség van.

Azonban hadd emeljünk ki egy-két „érdekességet” Montagnier közleményével kapcsolatban.

Először is: eredeti cikkeik [24, 25] megírása óta nem közöltek újabb eredményeket, így kísérleteik részletes technikai leírását sem. Ezek hiányában nem lehetséges munkájuk reprodukálása, sőt lényegi vizsgálata sem.

Azután kijelentik, [25] hogy a kiterjesztett koherenciatartomány mérete 100 nm, és hogy ennek a tartománynak a dimenziója az alacsony frekvenciájú elektromágneses mező  $\lambda$  hullámhossza. Egyébként hivatkoznak az (1) egyenletre, ami semmi egyéb, mint a Planck hatáskvantum-definíciója,  $E = h \cdot \nu$ , a gerjesztési energiára nézve. Könnyen kiszámítható, hogy például a 7 Hz frekvenciájú elektromágneses mező hullámhossza nem 100 nm, hanem a  $\lambda = c / \nu$  összefüggésből (ahol  $c$  a fénysebesség,  $2,97 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\nu = 7 \text{ s}^{-1}$ ), a hullámhossz kb.  $4 \cdot 10^9 \text{ cm}$ , azaz 40 000 km, tehát a Föld kerülete. Ez jó összhangban van azzal, hogy az ilyen nagyon alacsony frekvenciájú elektromágneses tereket a Föld mágneses terével kapcsolják össze (geomágneses Schumann-módusok), de figyelembe véve, hogy  $100 \text{ nm} = 10^{-5} \text{ cm}$ , az előző hullámhossz és a koherenciatartomány mérete között 15 nagyságrend különbség van! Mivel rezonancia csak közel azonos frekvenciák között jöhet létre, érvelésük képtelensége kézenfekvő!

Egy további és sarkalatosan megkérdőjelezhető elképzelésük, hogy az alacsony frekvenciájú és rendkívül kis intenzitású sugárzás által indukált DNS elektromágneses hullámok a célkémcsőben levő kémiai kiinduló anyagokból DNS-t szintetizálnak, és pedig annak a térbeli információnak alapján, amelyet a víz szerkezetében indukálnak. Ami egyébként feltételezi, hogy a víz szerkezeti változásai hosszú időn át (több másodpercen át) fenntarthatók. Ezzel szemben közismert, hogy a víz szerkezetek élettartama pikoszekundumos, vagy annál rövidebb. A DNS szintézisének kiváltásához plazmaszerű szabad elektronok jelenlétét feltételezik. Ezeknek a szabad elektronoknak a forrását azonban nem magyarázzák. Köztudott, hogy szabad elektronok valóban alkotóelemei a plazmáknak, de plazmakeltéshez nagyon nagy elektromágneses energiák (pl. lézersugárzás) szükségesek.

Ahhoz tehát, hogy Montagnier és szerzőtársai állításait komolyan vegyük, a fizika és kémia több alapösszefüggését és törvényét el kell vesszük. Az olvasóra bízunk, hogy ezek után mi várható az itteni csatátéren zajló küzdelmek kimenetelével kapcsolatban.

### IRODALOM

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Pathological\\_science](http://en.wikipedia.org/wiki/Pathological_science) (utolsó hozzáférés: 2013. december 2.)
- [2] <http://www.cs.princeton.edu/~ken/Langmuir/langmuir.htm> (utolsó hozzáférés: 2013. december 2.)
- [3] R. L. Park, *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud*, Oxford University Press, Oxford, 2010.
- [4] R. K. Merton, *The Sociology of Science*, Chicago University Press, Chicago, 1973.
- [5] R. K. Merton, *Priorities in Scientific Discovery*, Amer. Social. Rev. (1957) 22, 635.
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific\\_priority](http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_priority) (utolsó hozzáférés: 2013. november 20.)
- [7] P. H. Ribbe, *Mammon and prestige in earth science departments*, Am. Mineralogist (1988) 73, 1221.
- [8] Th. Hobbes, *Leviathan* (1651), Reprinted 1952, Chicago: Encyclopedia Britannica, Inc., Great Books series, vol. 23, 86.
- [9] <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=intense-competition-among-scientists-gotten-out-of-hand> (utolsó hozzáférés: 2013. november 20.)
- [10] <http://explorable.com/competition-in-science> (utolsó hozzáférés: 2013. november 20.)
- [11] <http://www.dallasvoice.com/who-discovered-hiv-gallo-montagnier-or-both-1021402.html> (utolsó hozzáférés: 2013. november 20.)
- [12] <http://www.whale.to/a/scheff34.html> (utolsó hozzáférés: 2013. november 20.)
- [13] <http://historyenginge.richmond.edu/episodes/view/5263> (utolsó hozzáférés: 2013. november 20.)
- [14] I. Hargittai, *The Road to Stockholm. Nobel Prizes, Science and Scientists*. Oxford University Press, Oxford, 2002.
- [15] H. Zuckerman, *Scientific Elite, Nobel Laureates in the United States*. The Free Press, New York, 1979.
- [16] U. Söderlind, *The Nobel Banquets. A Century of Culinary History (1991–2001)*. World Scientific, New Jersey, Singapore, 2005.
- [17] <http://wikipedia.org/wiki/HIV> (utolsó hozzáférés: 2013. november 21.)

## DNS leképezése vízben: valóság vagy patológiás tudomány?

- [18] [http://hu.wikipedia.org/wiki/Luc\\_Montagnier](http://hu.wikipedia.org/wiki/Luc_Montagnier) (utolsó hozzáférés: 2013. november 22.)
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Gallo](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Gallo) (utolsó hozzáférés: 2013. november 22.)
- [20] <http://en.wikipedia.org/wiki/HIV> (utolsó hozzáférés: 2013. november 22.)
- [21] R. Bazell, NBC News, June 10, 2008, <http://www.nbcnews.com/id/27049812/#.UpLrN9JLNCg> (utolsó hozzáférés: 2013. november 21.)
- [22] <http://www.washington.edu/alumni/columns/march98/nobels1.html> (utolsó hozzáférés: 2013. november 26.)
- [23] <http://www.washington.edu/alumni/columns/march98/nobels2.html> (utolsó hozzáférés: 2013. november 26.)
- [24] L. Montagnier, J. Aissa, S. Ferris, J.-L. Montagnier, C. Lavallee, Electromagnetic Signals Are Produced by Aqueous Nanostructures Derived from Bacterial DNA Sequences. *Interdiscip.Sci.Comput. Life Sci.* (2009) 1, 81.
- [25] L. Montagnier, J. Aissa, E. DelGindice, C. Lavallee, A. Tedeschi, G. Vitiello, DNA Waves and Water, arXiv: 1012.5166v1[q-bio.OT] 23 Dec, 2010, megismételve: J. Phys. Conf. Ser. (2011) 36, 2007.
- [26] A. Goghlan, Scorn over claim of teleported DNA, *New Scientist*, 2011, 15 January, 8.
- [27] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Polimer%C3%A1z-%C3%A1nreakci%C3%B3> (utolsó hozzáférés: 2013. december 16.)
- [28] <http://www.the-scientist.com/?articles.view/articleNo/36645/title/PCR-Past-Present-Future/> (utolsó hozzáférés: 2013. december 5.)
- [29] <http://www.kurzweilai.net/forums/topic/nobel-laureate-claims-teleported-dna> (utolsó hozzáférés: 2013. december 6.)
- [30] <http://news.techworld.com/personal-tech/3256631/dna-molecules-can-teleport-nobel-prize-winner-claims/> (utolsó hozzáférés: 2013. december 6.)
- [31] [http://en.wikipedia.org/wiki/Jacques\\_Benveniste](http://en.wikipedia.org/wiki/Jacques_Benveniste) (utolsó hozzáférés: 2013. december 11.)
- [32] <http://www.termesztvilaga.hu/kulonsz/k001/rak.html> (utolsó hozzáférés: 2013. december 11.)
- [33] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Homeop%C3%A1tia> (utolsó hozzáférés: 2014. január 13.)
- [34] J. Maddox, Waves Caused by Extreme Dilution, *Nature* (1988) 335, 760.
- [35] J. Maddox, J. Randi, W. W. Stewart, High-dilution Experiments a Delusion, *Nature* (1988) 334, 287.
- [36] [http://www.huffingtonpost.com/dana-ullman/luc-montagnier-homeopathy-taken-seriously\\_b\\_814619.html](http://www.huffingtonpost.com/dana-ullman/luc-montagnier-homeopathy-taken-seriously_b_814619.html) (utolsó hozzáférés: 2013. december 11.)
- [37] <http://www.homeopathyworldcommunity.com/group/latesthomeopathynews/forum/topics/luc-montagnier-foundation> (utolsó hozzáférés: 2013. december 11.)
- [38] V. Elia, A. Marrasi, E. Napli, Aqueous Nanostructures in Water Induced by Electromagnetic Fields Emitted by EDS, *J. Therm. Anal. Calorim.* (2012) 107, 843.
- [39] P. Ball, Water: An Enduring Mystery, *Nature* (2008) 452, 291. <http://www.nature.com/nature/journal/v452/n7185/full/452291a.html> (utolsó hozzáférés: 2013. december 13.)
- [40] Ph. Wernet, D. Nordlund, U. Bergmann, M. Cavalleri, M. Odelius, H. Ogasawara, I. L. Å. Näslund, T. K. Hirsch, L. Ojamäe, P. Glatzel, L. G. M. Pettersson, A. Nilsson, The Structure of the First Coordination Shell in Liquid Water, *Science* (2004) 304, 995. <http://www.sciencemag.org/content/304/5673/995.full.pdf> (utolsó hozzáférés: 2013. december 11.)
- [41] <http://www.rsc.org/chemistryworld/2013/07/montagnier-dna-electromagnetic-wave-claim> (utolsó hozzáférés: 2013. december 11.)
- [42] I. Prigogine, Time, structure and fluctuations. Nobel Lecture, 1977.
- [43] I. Prigogine, La fin des certitudes. In: O. Jacob ed., Temps, chaos et les lois de la nature. Paris, 1966.
- [44] G. Nicholas, Physics of Far-equilibrium Systems and Self-organization. In: P. Davies, ed., The New Physics, New York, Cambridge University Press, 1989.
- [45] N. Marchettini, Del Giudice, V. Voeikov, E. Tezzi, Water: A Medium where Dissipative Structures are Produced by Coherent dynamics, *J. Theor. Biol.* (2010) 265, 511. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519310002560> (utolsó hozzáférés: 2014. január 13.)
- [46] J. A. Yinnon, V. Elia, Dynamics in Perturbed Very Dilute Aqueous Solutions, Theory and Experimental Evidence, *J. Mod. Phys. B.* (2013) 27.
- [47] V. Elia, N. Marchettini, E. Napoli, M. Nicoli, Calorimetric, Conductometric and Density Measurements of Iteratively filtered Water Using 450, 200, 100 and 25 nm Millipore filters, *J. Therm. Anal. Calorim.* (2013) 114, 927. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10973-013-3046-y#page-1> (utolsó hozzáférés: 2014. január 13.)
- [48] V. Elia, E. Napoli, M. Nicoli, Thermodynamic Parameters for the Binding Process of the OH<sup>-</sup> Ion with the Dissipative Structures. *Calorimetric and Conductometric Titrations, J. Thermal. Anal. Calorim.* (2010) 102, 1111. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10973-010-0757-1#page-1> (utolsó hozzáférés: 2014. január 13.)
- [49] V. Elia, E. Napoli, M. Nicoli, Calorimetric and Conductometric Titrations of Nanostructures of Water Molecules in Iteratively Filtered Water, *J. Therm. Anal. Calorim.* (2013) 111, 815. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10973-011-2164-7#page-1> (utolsó hozzáférés: 2014. január 13.)
- [50] L. Betti, V. Elia, E. Napoli, G. Trebbi, M. Zurla, D. Nani, M. Petruzzi, M. Brizzi, *Front. Life Sci.* (2011) 5, 117.
- [51] C. Rossi, A. Foletti, A. Magnani, S. Lamponi, New Perspectives in Cell Communication: Bioelectromagnetic Interactions, *Seminars in Cancer Biol.* (2011) 21, 207. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044579X11000289> (utolsó hozzáférés: 2014. január 13.)
- [52] M. Bischoff, E. Del Giudice, Communication and the Emergence of Collective Behavior in Living Organisms: A Quantum Approach. *Molecular Biology International* (2013) Article ID 987549. <http://www.hindawi.com/journals/mbi/2013/987549/> (utolsó hozzáférés: 2013. december 12.)
- [53] M. Cifra, J. Z. Fields, A. Farkadi, Electromagnetic Cellular Interactions, *Progr. Biophys. Molec. Biol.* (2011) 105, 223. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610710000660> (utolsó hozzáférés: 2014. január 13.)
- [54] Ed. Arranga, HIV-Autism-Vaccines: Facts and Hopes by Luc Montagnier (August 9, 2012) <http://www.autismone.org/content/hiv-%E2%80%93autism-%E2%80%93vaccinesfacts-and-hopes-luc-montagnier> (utolsó hozzáférés: 2013. december 13.)
- [55] M. Enserink, French Nobelist Escapes "Intellectual Terror" to Pursue Radical Ideas in China (Newsmaker Interview: Luc Montagnier), *Science* (2010) 330, 1732. [http://www.alternative-training.com/docs/Blog/LUC\\_MONTAGNIER.pdf](http://www.alternative-training.com/docs/Blog/LUC_MONTAGNIER.pdf) (utolsó hozzáférés: 2013. december 13.)

# Moore törvénye és a DNS-szekvenálás legújabb kori fejlődése

## Előszó

A DNS-szekvenálásnak [1] a genomkutatás [2–3] és a DNS-beli információörögzítés [4–6] miatt van különös és vitathatatlanul döntő jelentőségű szerepe mindkét területen, de ma már nélkülözhetetlen az orvosi diagnosztikában, a biotechnológiában, a törvényszéki orvostanban és a biológiai rendszerszervezésben is. Említést kell tenni az emberi genom projektről [7], a DNS-szekvenáláshoz köthető, eddig világméretben is az egyik legnagyobb kutatási erőfeszítésről. Ehhez és a múlthoz fűződően, főleg érdekességgént érdemes megemlíteni, hogy 2000-ben, amikor az említett projekt befejeződött, egy egyén genomjában levő körülbelül hárommilliárd bázispár meghatározása teljes évtizedet vett igénybe, és költségei, amiknek nagy részét a szekvenálás tette ki, közel voltak a százmillió dollárhoz. Nem meglepő, hogy a gyorsabban, olcsóbban, pontosabban elvárásokhoz illően merült fel az 1000 dolláros genomprogram gondolata, illetve terve [8], ami, mint elnevezése is jelzi, azt a célt tűzte ki, hogy 1000 dollárért meghatározhatóvá tegye egy egyén teljes genomállományát. Ez a törekvés napjainkban is fennáll.

A DNS-szekvenálás fejlődéstörténetét háromgenerációs tagoltságúnak írják le, részleteiben itt nem foglalkozunk vele, ismeretetésére kitűnő összefoglalók állnak rendelkezésre [9–11].

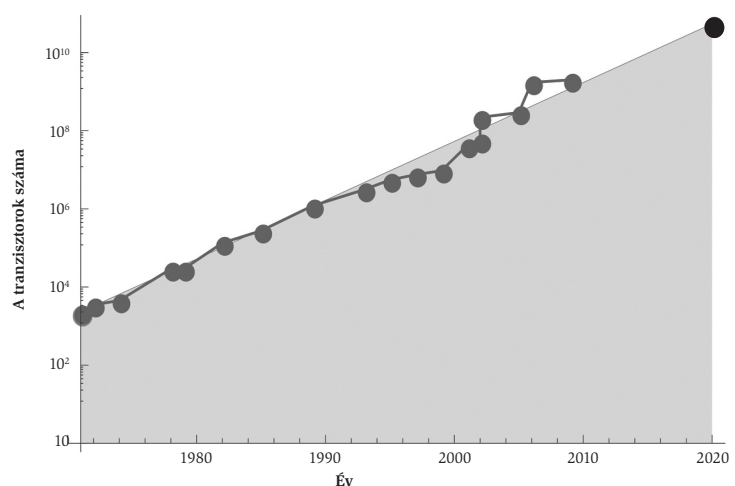
## Bevezetés

A következőkben előbb futólag vázolnánk a DNS-szekvenálási eljárások biokémiai, illetve molekuláris biológiai fejlődési útját, elsősorban annak első két generációját, és a harmadik generációra rátérve a DNS-szekvenálás költségeinek fejlődési, csökkenési törvényszerűségeit vizsgálunk egy műszaki területen tapasztalható fejlődési növekedéssel (a tranzisztorok fejlődésére vonatkozó *Moore-törvénnyel*) összehasonlítva.

A DNS szekvenálása [1] lényegében három alpműveletből áll, beleértve a minta-előkészítést, a fizikai szekvenálást és az újbóli összerendezést. A minta-előkészítés első lépése a célgenom fragmensekbe való darabolásából áll. A minta mennyiségétől függően ezek a fragmensek különböző molekuláris módszerekkel másolatokká sokszorozhatók. A fizikai szekvenáló fázisban a fragmensek mindegyik bázisa egyenkénti leolvasással azonosítható, és az összefüggően azonosított bázisok leolvasási hossz-ként jellemezhetők. Az összerendezési fázisban bioinformatikai szoftverrel összerakhatók az átlapoló leolvasások. Ez lehetővé teszi az eredeti genom folyamatos szekvenciákká való összefűzését. Minél terjedelmesebb a leolvasás hossza, annál könnyebb a genom összerakása. A fentiekhez jelentős fejlődést biztosított a polimeráz láncreakció (PCR) felfedezése [12].

## Moore törvénye

Moore törvényeként vált ismertté *Gordon Moore* [13], az Intel alapítójának az az 1965-ben tett megfigyelése, mely szerint integrált áramkörökben az egységnyi (négyzethüvelyknyi) felületre helyezhető tranzisztorok száma kétevenként megkétszereződik.



1. ábra. A tranzisztorok számának időbeli növekedése (Moore törvénye) [13]

Moore hozzátette, hogy ez az előrejelzés valószínűleg hosszú ideig érvényben marad (**1. ábra**). Moore törvénye tulajdonképpen az exponenciális növekedés szilíciumalapú tranzisztorok fejlődési sebességére vonatkoztatott változata, ahol a növekedés ütemét a

$$\frac{dx}{dt} = kx \quad (x: \text{tranzisztorok száma})$$

differenciálegyenlet írja le. Az egyenlet szerint a

$$\frac{dx}{dt}$$

növekedési, vagy csökkenési ütem a mindenkor  $x$ -szel arányos, tehát az

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{dt}$$

relatív növekedési, vagy csökkenési ütem állandó. Az  $x$  érték kétszereződési, vagy felezési ideje függ a  $k$  paramétertől:



## Moore törvénye és a DNS-szekvenálás legújabb kori fejlődése

$$k_0 t = \ln 2$$

Az egyenlet megoldásai

$$dx(t) = x_0 e^{kt} \text{ (exponenciális növekedésnél), illetve}$$

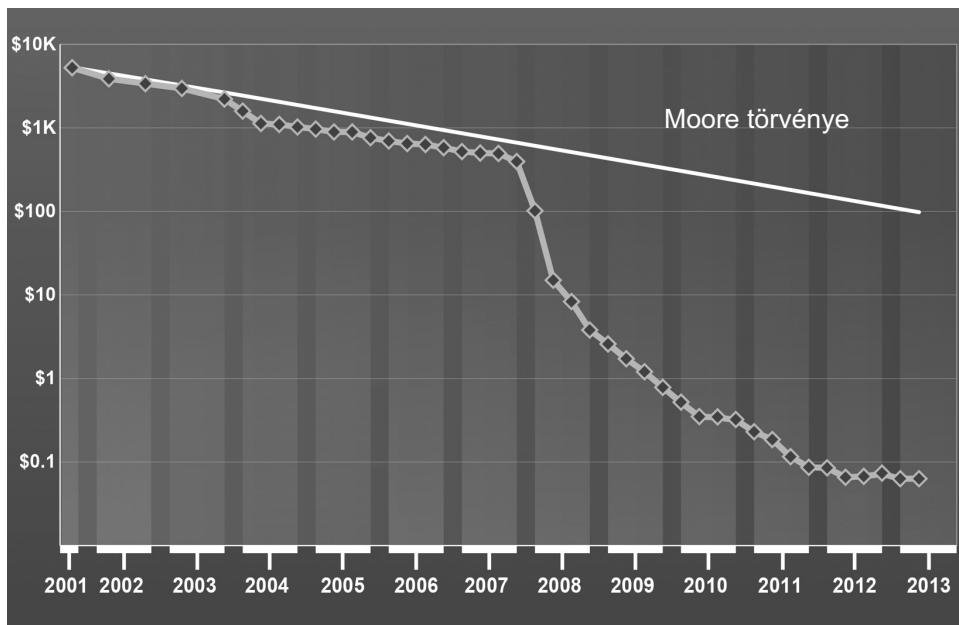
$$dx(t) = x_0 e^{-kt} \text{ (exponenciális csökkenésnél)}$$

exponenciális függvények.

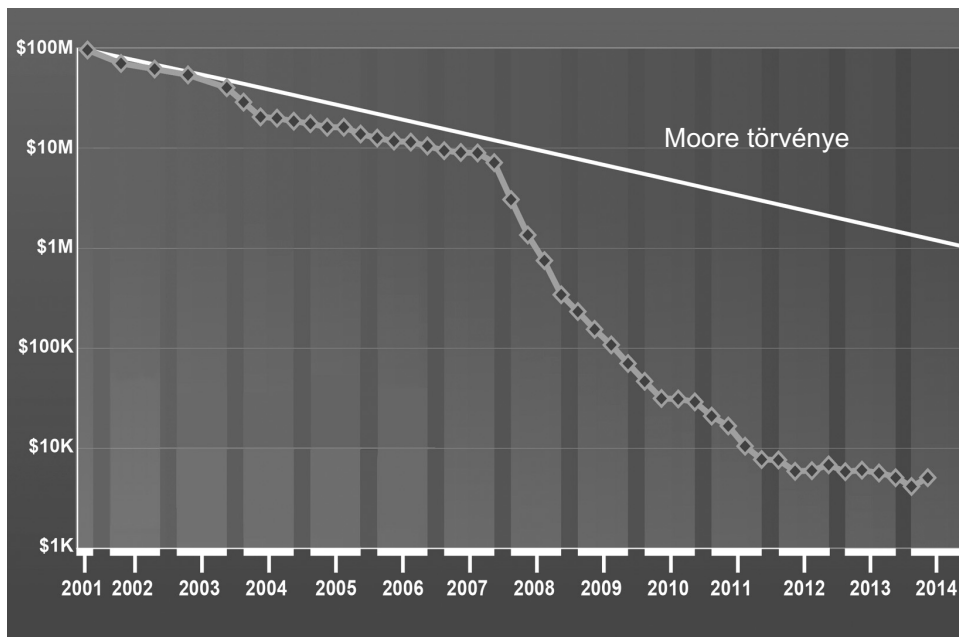
Általában (a Moore-törvény esetében) a relatív növekedési sebesség csak addig marad állandó, amíg például a tranzisztor-technológia fejlődését megszabó külső körülményekben lényeges változások nem lépnek fel (szilícium → grafén). A Moore-törvény számos más növekedési jelenség jellemzésére is alkalmasnak bizonyult és a növekedés mellett az exponenciális csökkenésre is érvényes [14, 15].

### A genomszekvenálási program

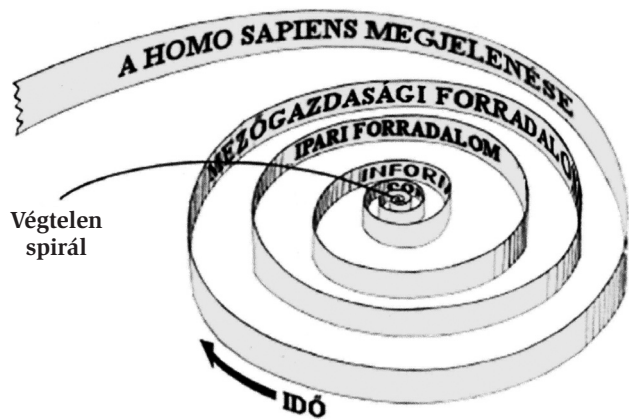
Az egyesült államokbeli Nemzeti Humán Genom Intézet (National Human Genom Institute, NHGI) hatalmas anyagi támogatással (19 millió dollár) már a múlt században kutatási programot indított DNS-szekvenáló technológiák fejlesztésére Genomszekvenálási Program (Genom Sequencing Program) elnevezéssel [16]. Számos éven keresztül az intézet tanulmányozta és követte



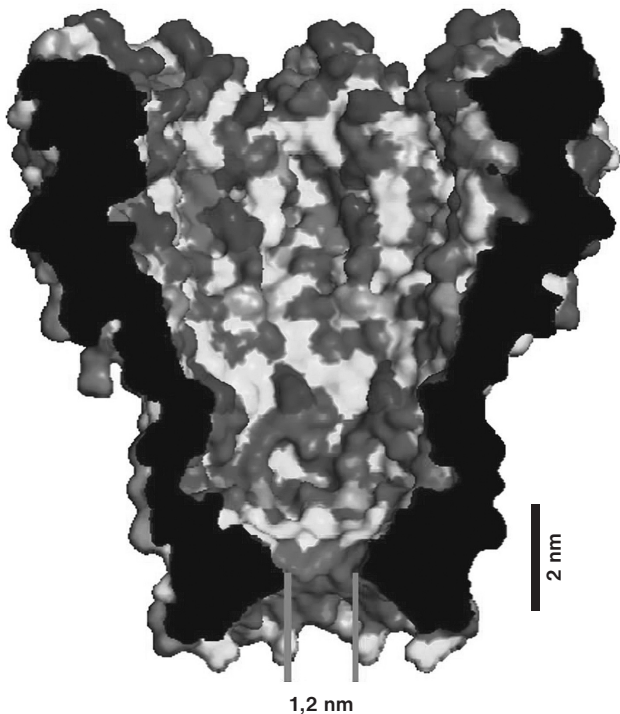
2. ábra. Egy megabázis DNS-szekvencia meghatározási költségének időbeli változása [18]



3. ábra. Egy emberi genom méretű genom szekvenálási költségének időbeli változása [19]



4. ábra. Technológiai szingularitási spirál [23]



5. ábra. Mycobacterium smegmatis porin A (MspA) mikropórus [26]

az intézet által létesített szekvenáló központok DNS-szekvenálásainak költségeit. Az így született információ jelentős összehasonlítási alapként szolgált a DNS-szekvenáló technológiák javításához és a szekvenálási program kapacitásának felmérésére, illetve fokozására [17]. A felmért adatok a következők voltak:

- megabázis (Mb) DNS-szekvenálás költségei, azaz egy megabázis (Mb: egymillió bázis) meghatározott minőségű DNS-szekvenálásának ára,
- ár/genom, azaz egy humán méretű genom szekvenálásának ára.

Az eredményeket a 2. és 3. ábra szemlélteti.

Mint az ábrákon látható, az intézet a 2001 és 2007 közötti időszakra úgy tekintett, és ezt kifejezésre is juttatta, hogy a szédületes sebességű költségcsökkenés valóban követte a Moore-féle exponenciális törvényt. De míg a tranzistorok számának növekedési Moore-törvénye mindmáig, azaz 1965 és 2014 közötti időszakra vonatkozóan érvényesnek bizonyult, addig, mint az ábrákon látható, a DNS-szekvenálási költségek körülbelül 2008-tól kezdődően további, mindmáig tartó még jelentősebb zuhanásba kezdtek, azaz újabb, négy nagyságrendnyi csökkenést mutattak. Ez természetesen számos, főleg technológiai, gépesítési, automatizálási fejlődési lépés eredménye, de az NHGI a csökkenést főleg a következő, harmadik generációs szekvenálási eljárások és berendezések kialakulásának tulajdonította, amikor a szekvenálási központok az 1975-ben bevezetett Sanger-alapú [20,21] kémiaiokról és kapilláris műszerekről áttértek az újabb, második, illetve harmadik generációs technológiákra [21].

Bár a 2. és 3. ábrákon bemutatott Moore-törvény szerinti exponenciális költségcsökkenést, mint látható, a NHGI csak 2001-től „könyvelte”, hangsúlyozandó, hogy a csökkenés már a Sanger-szekvenálás (1971) beindulásával elkezdődött [22]. A Moore-törvény által előre látott, és körülbelül 2008-tól kezdődő DNS-szekvenálás költségcsökkenési sebesség az exponenciálisnál is gyorsabb, például az úgynevezett technológiai szingularitással is értelmezhető. Ugyanis jövőkutatók, Raymond Kurzweillel az élükön, elméletükben a Moore-törvényt általánosították a technológiai fejlődésre, általában gyorsított exponenciális mintát látva az emberi történelemben. Kurzweil szerint ez az exponenciálisnál is gyorsabb folyamat a 21. században, spirálszerűen, nagyszámú fordulattal egyre rövidebb idő alatt (4. ábra) elképzelhetetlen gyorsaságú technológiai fejlődéshez, szingularitáshoz vezet [23, 24].

## A DNS-szekvenálás műszerezettsége, automatizálása és biztató fejlődési irányai

Bár a szekvenálás műszerezettségével és automatizálásával itt nem kívánunk részleteiben foglalkozni, természetesen mindezeknek rendkívül jelentős szerepe volt a szekvenálás sebességének és költségeinek feljebb vázolt gyorsulási fejlődésében. Számos új szekvenálási technológiára épült műszert gyártanak és forgalmaznak világszerte [21,24].

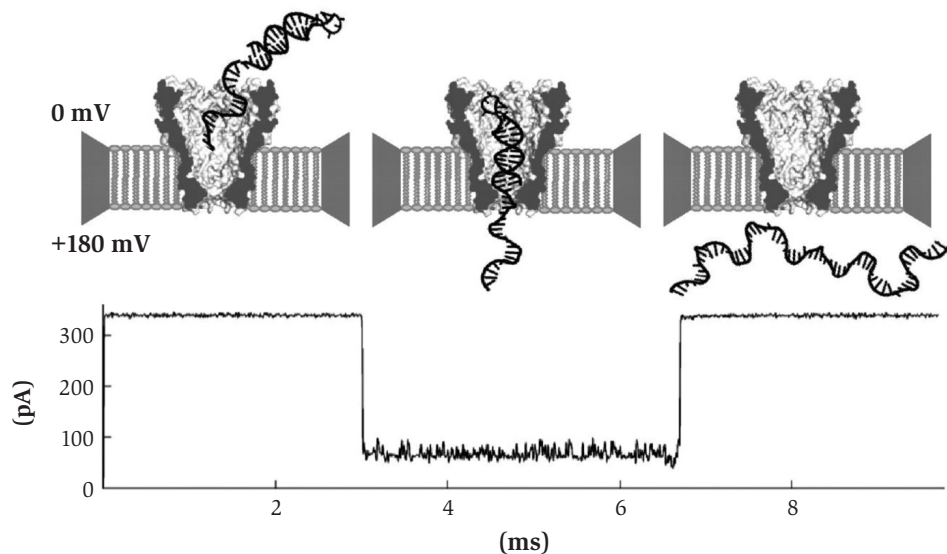
Érdemes azonban bizonyos figyelmet szentelni azoknak az új és biztató szekvenálási technikáknak, amelyekben a nanotechnológia és a biológia összevonásával kísérleteznek még szekvenálási eljárásokat még gyorsabbá, pontosabbá és hatékonyabbá tenni. Az új eljárások elvére vonatkozóan szellemes összehasonlításként említik, hogy amikor meg kívánnánk számolni az emberek számát egy tömegben, akkor például szemre „megsaccolják” a számot, de ez természetesen nagyon pontatlan lesz. Sokkal pontosabb számlálási eredmény érhető el, ha az emberek átmennek egy fordulatszámológóval ellátott forgóajtón. Ez utóbbi hasonló ahhoz a modellhez, amelyben olyan „DNS-számlálót” hoztak létre, ami képes egy képzeletbeli forgóajtót helyettesítő, 2 nm-nél szűkebb nanopóruson, vagy lyukon áthaladó egyedi DNS-molekulákat detektálni és megszámlálni, azaz szekvenálni.

2013-ban került nyilvánosságra, hogy a washingtoni Nemzeti Humán Genom Intézet (NHGI) 17 millió dolláros kutatási támogatási projektet hirdetett meg Fejlett DNS-szekvenáló Technológiák (Advanced DNA Sequencing Technologies) programja keretében, amiben hét olyan kutatócsoportot támogat, akik a szekvenálást olcsóbbá, gyorsabbá tételével foglalkoznak. Öt a tá-

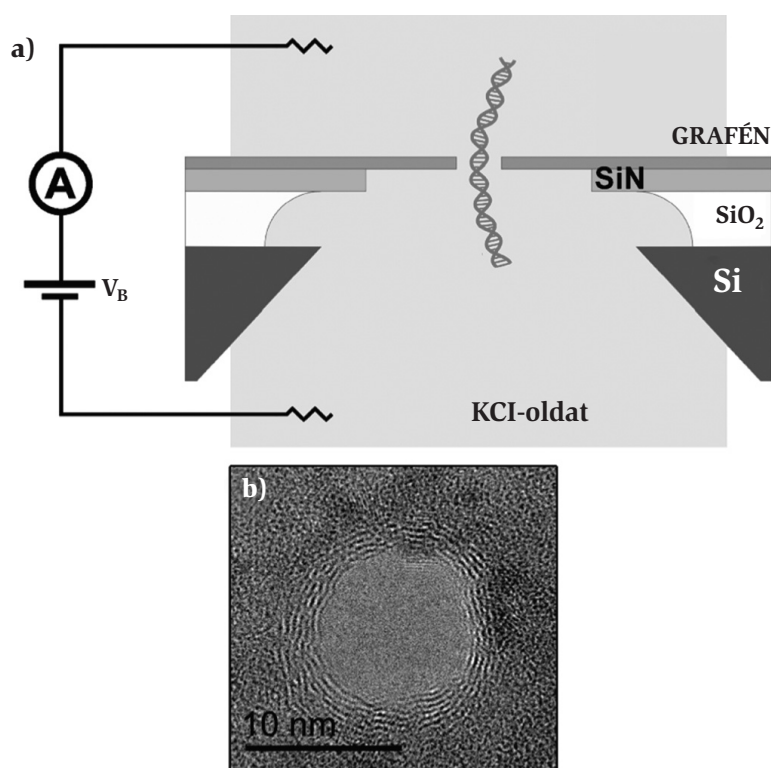
## Moore törvénye és a DNS-szekvenálás legújabb kori fejlődése

mogatott projektek közül a nanopórusokra alapozott technológiákkal, míg a többiek mikrofluidikával, csip-alapú, illetve fényalapú szekvenálással közelítik meg a kitűzött célt. A nanopórusos DNS-szekvenálás legegyszerűbb módja az, amikor egy egyszálú DNS egyedi nukleotidjai a nanopóruson áthaladva a póruson átfolyó ionos áramot modulálják az áram mérésével lehetővé téve a DNS-szekvencia mérését. A *Mycobacterium smegmatis* porin A (MspA) baktériumból elkülönített porin A-fehérjével határolt nanopórus (**5. ábra**) meg tudja különböztetni mind a négy DNS-nukleotidot, és felismeri az egyedi nukleotidokat az egyszálú DNS-ben, amikor a kétszálú DNS ideiglenesen rögzíti a nukleotidot a pórusos szűkületben. A DNS-t felépítő mind a négy nukleotid jól elkülöníthető jelet ad, ami oszcilloszkóppal megjeleníthető, és a kijelzőről leolvasható a DNS-szekvencia (**6. ábra**) [26].

A fentiekhez hasonló lehetőség a baktériumból (MspA) álló biológiai nanopórus helyett szintetikus membránokban kialakított nanopórusok igénybevétele. Eleinte e célból szigetelőkkel, például szilícium-nitriddel [27] vagy szilícium-dioxiddal [28] kísérleteztek, de ezekkel nehézségek adódtak a megfelelő vastagságú membránok előállításánál. A legutóbbi időben azonban több kutatócsoport rátért a grafénmembránok, illetve -szalagok alkalmazásának a vizsgálatára. A grafénmembrán vastagsága 0,335 nm, ami a DNS-ben két bázis közötti távolság. Ezekben a membránokban TEM elektronmikroszkóppal vésődtek megfelelő méretű pórusok, és KCl-oldatban a grafénmembrán lehetővé teszi, hogy az elektromos potenciált közvetlenül a nanopórusnál érzékeljék és ellenőrizzék (**7. ábra**) [29]. De 2013-ban javasoltak már olyan eljárást is, amelyben grafénnanoszalaggal hoztak létre tran-

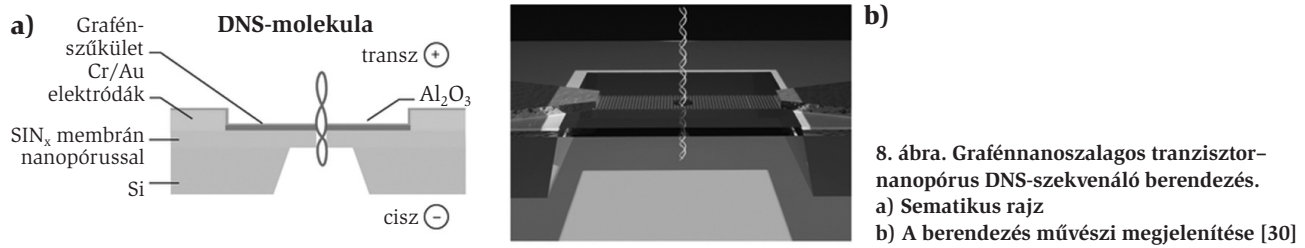


6. ábra. DNS-szekvenálás MspA-val [26]



7. ábra. DNS-szekvenálásra alkalmas grafénnanopórusos membrán.  
a) A membrán KCl-oldatban és kapcsolási rajz  
b) Nanopórus TEM mikroszkópos felvétele [29]

## Moore törvénye és a DNS-szekvenálás legújabb kori fejlődése



zisztor szenzort; a berendezés a DNS-molekulák póruson való áthaladását az ionos áram és a helyi feszültségek csökkenésével egyszerre érzékeli (8. ábra) [30].

## Utószó

A fentiek elsősorban a tudomány, illetve a tudományos kutatás szédületes fejlődését kívánták bemutatni a biokémia, annak egy kiemelten fontos területe, a DNS-szekvenálás példáján. Nem véletlen, hogy a bemutatás a tranzisztortekológiával való összehasonlítás alapján történt, lévén ez utóbbi a tudományos kutatás fejlődési sebességének szintén kiemelt jelentőségű és égbeszökően gyorsan fejlődő területe. A tranzisztorkutatás fejlődése már önmagában is lélegzetelállító, és a fejlődés ütemének hosszú időn át tartó stabilitása külön figyelemre méltó. A DNS-szekvenálás fejlődésének még ennél is sebesebb volta bizonyítja, hogy hová vezethet ez a fejlődés, és felveti a kérdést, hogy van-e, vagy lehet-e ennek feltételezett, vagy előre látható határa.

## IRODALOM

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/DNA\\_sequencing](http://en.wikipedia.org/wiki/DNA_sequencing) (utolsó hozzáférés: 2014. január 30.)
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Genome> (utolsó hozzáférés: 2014. január 17.)
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Genome> (utolsó hozzáférés: 2014. január 17.)
- [4] N. Goldman, P. Bertone, S. Chen, Chr. Dessimoz, E. M. LeProust, B. Sipos, E. Birney, Towards practical high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA, Nature (2013), 494, 77. <http://www.pkusz.edu.cn/uploadfile/2013/0313/20130313095210302.pdf> (utolsó hozzáférés: 2014. január 17.)
- [5] <http://www.sciencemag.org/content/early/recent/16August2012/Page1/10.1126/science.1226355>; [http://arep.med.harvard.edu/pdf/Church\\_Science\\_12.pdf](http://arep.med.harvard.edu/pdf/Church_Science_12.pdf) (utolsó hozzáférés: 2014. január 17.)
- [6] Braun Tibor, Adat-, információ-, és ismerettárolás az örökkévalóságnak. Remények kvarcban és DNS-ben. Magy. Kém. Lapja (2013), 68, 376. [http://www.mtak-szi.iif.hu/kszi\\_aktak/doc/BrT\\_32.pdf](http://www.mtak-szi.iif.hu/kszi_aktak/doc/BrT_32.pdf) (utolsó hozzáférés: 2014. január 17.)
- [7] [http://hu.wikipedia.org/wiki/Human\\_Genome\\_Project](http://hu.wikipedia.org/wiki/Human_Genome_Project) (utolsó hozzáférés: 2014. január 17.)
- [8] [http://wikipedia.org/wiki/\\$1,000\\_genome](http://wikipedia.org/wiki/$1,000_genome) (utolsó hozzáférés: 2014. január 17.)
- [9] G. M. Church, Genomes for all. Sci. American (2006) January, 47. <http://arep.med.harvard.edu/pdf/Church05s.pdf> (utolsó hozzáférés: 2014. január 30.)
- [10] M. L. Metzker, Sequencing technologies, the next generation. Nature, Reviews. (2010) 11, 31. [http://eebweb.arizona.edu/nachman/Further%20Interest/Metzker\\_2009.pdf](http://eebweb.arizona.edu/nachman/Further%20Interest/Metzker_2009.pdf) (utolsó hozzáférés: 2014. január 30.)
- [11] E. E. Schadt, S. Turner, A. Kasarkis, A window to third-generation sequencing. Hum. Molec. Gen. (2010) 19, R 227. <http://hmg.oxfordjournals.org/content/19/R2/R227.abstract> (utolsó hozzáférés: 2014. január 30.)
- [12] <http://link.springer.com/protocol/10.1385%2F1-59259-384-4%3A3#page-1> (utolsó hozzáférés: 2014. február 17.)
- [13] G. E. Moore, Electronic Magazine(1965) April 19, 4. [http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee1/docs/Excepts\\_A\\_Conversation\\_with\\_Gordon\\_Moore.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2012/ph250/lee1/docs/Excepts_A_Conversation_with_Gordon_Moore.pdf), Intel Corporation, 2005, 1. <https://www.kth.se/social/upload/507d1d3af276540519000002/Moore's%20law.pdf> (utolsó hozzáférés: 2014. január 30.)
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moore%27s\\_law\\_graph.svg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Moore%27s_law_graph.svg) (utolsó hozzáférés: 2014. január 30.)
- [15] [http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law) (utolsó hozzáférés: 2014. január 31.)
- [16] <http://www.genom.gov/10001671> (utolsó hozzáférés: 2014. január 31.)
- [17] <http://www.genome.gov/sequencingcosts> (utolsó hozzáférés: 2014. január 31.)
- [18] [http://www.genome.gov/images/content/cost\\_per\\_megabase\\_apr.jpg](http://www.genome.gov/images/content/cost_per_megabase_apr.jpg) (utolsó hozzáférés: 2014. január 31.)
- [19] [http://www.genome.gov/images/content/cost\\_per\\_genome2.jpg](http://www.genome.gov/images/content/cost_per_genome2.jpg) (utolsó hozzáférés: 2014. január 31.)
- [20] F. Sanger, A. R. Coulson, A rapid method for determining sequences in DNA by primed synthesis with DNA polymerase. J. Mol. Biol. (1975) 94, 441. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022283675902132#> (utolsó hozzáférés: 2014. január 31.)
- [21] F. Sanger, S. Nicklen, A. R. Coulson, DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. Proc. Natl. Acad. Sci. (1977) 74, 5463. <http://www.pnas.org/content/74/12/5463.full.pdf> (utolsó hozzáférés: 2014. január 31.)
- [22] A. Szopa-Comley, DNA sequencing towards the third generation and beyond. Drug Discovery World (2013) Spring, 29. <http://www.ddw-online.com/enabling-technologies/p211492-dna-sequencing-towards-the-third-generation-and-beyondspring-13.html> (utolsó hozzáférés: 2014. február 13.)
- [23] <http://www.kurzweilai.net/dna-sequencing-cost> (utolsó hozzáférés: 2014. február 3.)
- [24] [http://hu.wikipedia.org/wiki/Technol%C3%B3giai\\_szingularit%C3%A1s](http://hu.wikipedia.org/wiki/Technol%C3%B3giai_szingularit%C3%A1s) (utolsó hozzáférés: 2014. február 3.)
- [25] M. L. Metzker, Emerging technologies in DNA sequencing. Genome Res. (2005) 15, 1767. <http://genome.cshlp.org/content/15/12/1767.long> (utolsó hozzáférés: 2014. február 4.)
- [26] <http://www.pnas.org/content/107/37/16060.long> (utolsó hozzáférés: 2014. február 5.)
- [27] J. Li, D. Stein, c. McMullan, D. Branton, M. J. Aziz, J. A. Golovchenko, Ion-beam sculpting at nanometre length scales. Nature (2001) 412, 166. <http://www.nature.com/nature/journal/v412/n6843/full/412166a0.html> (utolsó hozzáférés: 2014. február 6.)
- [28] A. J. Storm, J. H. Chen, x. S. Ling, H. N. Zandbergen, C. Dekker, Fabrication of solid-state nanopores with single-nanometre precision. Nature, Materials (2003), 2, 537. <http://www.nature.com/nmat/journal/v2/n8/full/nmat941.html> (utolsó hozzáférés: 2014. február 6.)
- [29] C. A. Merchant, K. Healy, M. Wanunu, V. Ray, N. Peterman, J. Bartel, M. D. Fischbein, K. Venta, Z. Luo, A. T. Ch. Johnson, M. Drndić, DNA Translocation through Graphene Nanopores. Nano Letters (2010) 10, 2915. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/nl101046t> (utolsó hozzáférés: 2014. február 6.)
- [30] F. Traversi, C. Raillon, S. M. Benamer, K. Liu, S. Khly-bov, M. Tosun, D. Krasnozhan, A. Kis, A. Radenovic, Detecting the translocation of DNA through a nanopore using graphene nanoribbons. Nature Nanotechnology (2013) 8, 939.



# Mao elnök által kezdeményezett maláriaellenes gyógyszerkutatás

## Az artemizinin felfedezése

### Kémiai múlt, biotechnológiai jelen és jövő

#### Malária a világban

Az emberek életét évezredek óta veszélyeztető malária oka a *Plasmodium falciparum* vörösvérsejtbeli szaporodása a moszkítószúnyogok terjesztésével. A malária tüneteit Kínában már Kr. e. 2700 körül leírták a „*Huang Di nei jing*”, a „Sárga Császár belső könyve”-ben, de a *Plasmodium* parazitát Charles Louis Alphonse Laveran francia katonaeorvos fedezte fel egy maláriás beteg vérében 1880-ban. Laverant ezért a felfedezésért 1907-ben Nobel-díjjal tüntették ki. A kezdetben a kínafa (*Cinchona officinalis* L.) kéregből izolált kinin bizonyult a legeredményesebb maláriaellenes gyógyszernek, de az idők folyamán a *Plasmodium* törzsekben kininrezisztencia alakult ki. A malária elsősorban a trópusi országokat sújtja. A WHO adatai szerint napjainkban még mindig 3,3 milliárd ember van potenciálisan kitéve a megbetegedésnek a világ 109 országában [1].

#### Eredet és történelmi előzmények

A „négyek bandájának” később elnevezett hatalmi együttes 1974–76-ban uralta Kínát és a Mao által indított kínai kulturális forradalmat. A négyek legismertebb tagja Csiang Csiang, Mao harmadik felesége, valahai sanghaji színésznő, társai Csang Csun-csiao, a teoretikus, Jao Ven-jián, a propagandista, a média abszolút ura és Vang Hung-ven, előzőleg biztonsági őr egy textilgyárban. A négyek alapvetően antiintellektuális, a kutatókkal és műszakiakkal szembeni ellenséges nézeteket vallottak.

A négyek bandájának tevékenysége folytán és a kulturális forradalom társadalmi légkörében Mao Kínája nagymértékben elszigetelődött a fejlettebb világtól, és ebből természetesen a tudományos kutatás sem képezhetett kivételt. Így például Kínában hozzáférhetetlenné váltak a tudományos kutatáshoz többek között nélkülözhetetlen külföldi könyvek és folyóiratok.

#### Az „523-as projekt” és az artemizinin felfedezése



1. ábra. Az *Artemisia annua* növény (egynyári üröm) [3]

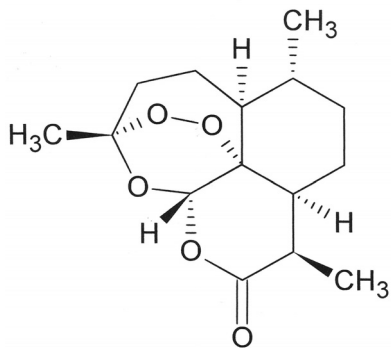
Valószínűleg Mao hosszú menetelésből származó számos emléke és a vietnamiak, különösen a legendás hírű Giap tábornok maláriával kapcsolatos segélykérései hatására a kínai kormány 1967. május 23-án eldöntötte az „523-as projekt”-nek elnevezett maláriakutatási program létrehozását. Az 523 május (5. hónap) 23-át jelenti. Koordinálására Csou En-lai akkori miniszterelnököt, végrehajtására az általa személyesen felügyelt, körülbelül 500 kutatóból álló „523 vezető csoportot” jelölték ki.

Szigorú titkosítása révén a projekt működése már eleve patológias körülmények között zajlott úgy társadalmi, mint tudományos vonatkozásban. Ennek ellenére, valamilyen rejtélyes belső mechanizmus következtében, a tudományos kutatás egyik, egyébként szükséges és nélkülözhetetlen velejárója, a tudományos publikálás egy sajátos formája az „523-as projekt” esetében is kialakulhatott, így mély titkossága ellenére is visszagöngyölíthető a kutatás története. A projekt fő feladata „új maláriaellenes gyógyszerek felfedezése [volt] a malignus malária kezelésére trópusi területeken”. A projekt vezetése két fontos kutatási irányt jelölt meg: új, maláriaellenes gyógyszerek szintézisét (ezzel itt nem foglalkozunk), illetve a hagyományos kínai gyógyászatban évszázadok óta használatos malária elleni növényi és más eredetű szerek vizsgálatát.

A projekt keretében több mint 2000 hagyományos kínai gyógynövényből ajánlott receptet vizsgáltak meg, és úgy találták, hogy 640-nek lehet valamilyen maláriaellenes hatása. Maláriás rágcsálókön végzett vizsgálataik szerint 200 gyógynövény és ezek 380 kivonata rendelkezett bizonyítható hatással. A reményt keltő növények közül eredetileg az *Artemisia annua* L. (*Qing Hao*) (1. ábra) nevű<sup>1</sup>, Ázsiában honos,

<sup>1</sup> A Qing Haót már az okorban ismerték, például aranyér kezelésére és lázcsillapításra használták.

## Az artemizinin felfedezése



2. ábra. Az artemizinin szerkezete [4]



3. ábra. A kínai kulturális forradalom alatt és után publikált cikkek a (Qinghaosu) artemizininről [2]



4. ábra. Kínai Artemisia-ültetvény és kistermelő [6]

hazánkban is megtalálható (magyar neve *egynyári üröm*) ürömfaj leveleiből főzött tea körülbelül 68 százalékban gátolta a *Plasmodium* parazita fejlődését<sup>2</sup>.

A projekt eredményeit leíró kutatásokat első ízben tízévi kémiai kutatás után 1977-ben ismertették tudományos cikk formájában. A cikk, természetesen kínai nyelven a *Ke Xue Tong Bao (Chinese Science Bulletin)* című folyóiratban jelent meg. Az egyoldalas cikk címe: „A szeszkviterpén-lakton egy új változata: qinghaosu”. A cikk a következő szöveggel kezdődik: „Az *Artemisia annua* növényből (1. ábra) egy kristályos vegyületet (2. ábra) választottunk el, ami a kínai qinghaosu nevet kapta.” A cikk a vegyület tulajdonságainak vizsgálatával folytatódik. Valószínűleg ebben a cikkben említik először a qinghaosu elnevezést.

A qinghaosuról beszámoló második cikk 1979-ben jelent meg, szintén kínaiul a *Hua Xue Xue Bao (Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities)* című folyóiratban. Szintén 1979-ben a *Chinese Medical Journal* ezúttal angolul publikálta azt a cikket, amely a qinghaosut (artemizint) és malária gyógyítására való alkalmazását a világ tudomására hozta. „A qinghaosu kristálszerkezete és abszolút konfigurációja” című cikk angol nyelven jelent meg a *Scientia Sinica* című folyóiratban 1980-ban (3. ábra). Az 523-as projekt keretében azt is tisztázták, hogy az artemizinin molekulában a maláriaellenes gyógyszerhatáshoz a 2. ábrán is látható peroxicsoprot a hatást kiváltó elengedhetetlen tényező.

Az artemizininről és hatásmechanizmusáról azóta jelentékeny mennyiségű szakirodalom jelent meg; egy hasznos összefoglalót itt is megemlítettünk [5,6].

## Az artemizinin világtermelése és forgalmazása

A malária gyógyítását tekintetbe véve feltétlenül megemlítendő, hogy az Egészségügyi Világszervezet (WHO) jóváhagyott egy növényi artemizinin és egy másik maláriaellenes gyógyszer együttes alkalmazására épített *Artemisinin Combination Therapies (ACT)* gyógyszeres koktélt, amit számos maláriaérintett országban alkalmaznak.

2013 körülre a világ *Artemisia*-termesztését körülbelül 100 000 ázsiai és afrikai az *Artemisia annua* (egynyári üröm) mezőgazdasági termesztésére szakosodott kistermelő látta el (4. ábra), és ezt a terméket még a Kínában vadon termő növény begyűjtése is kiegészítette. Jelenleg a világ teljes artemiziningyártásának 80%-a Kínában termesztett *Artemisiából* származik. Vietnam lemaradva követi, körülbelül 10%-os termesztéssel, a maradék Madagaskarból, Kenyából és Ugandából származik. Csekély mennyiséget Indiában is termesztene, úgyszintén Zimbabweban, Dél-Afrikában és Nigériában. Az átlagos telepített *Artemisia* terméshelyület kistermelőként Kínában és Afrikában körülbelül 0,2 hektár. Egy kilogramm szárított *Artemisia* levélből körülbelül 8 gramm artemizinin állítható elő. Jelenleg a világ artemizinin-igénye körülbelül 150–180 metrikus tonna (MT), a fő vásárlók a WHO által javasolt gyógyszer-kombinációt (ACT) előállító gyógyszergyárak, és ára körülbelül 250–270 USD/kg.

Lévn, hogy az *Artemisia* termesztése a világban koordinálatlanul folyt, a termés betakarítása és így a gyógyszergyárak ellátása is rendezetlenül alakult az utóbbi évtizedek során. Ennek megfelelően a gyógyszer ára ingadozott, és időnként az ellátásban is hiányok mutatkoztak. Az ezzel kapcsolatos aggodalmakat 2004-ben egy egyesült államokbeli nagyon alapos tanulmányban is kifejezték [8]. Az aggodalom azért is különlegesen indokolt, mert kérdéses, hogy lehet-e egy olyan, körülbelül egymilliárd embert érintő betegség esetleges gyógyítására épített gyógyszert, mint az

<sup>2</sup> Diónszeghy Sámuel 19. század elején kiadott könyvében is megemlítette az egynyári üröm szerepét az akkor Magyarországon is jelentős betegség, a malária kezelésében: „... az üröm igen jó sárgaságban, máj- és lépdagadásban és a napos hideglelésben”. A kiegészítésért köszönet Csopor Dezsőnek.

## Az artemizinin felfedezése

artemizinin, nyersanyagának (*Artemisia*) rapszodikus mezőgazdasági termesztésére alapozni akkor, amikor kimutatták, hogy a jelenlegi jelentős és nem teljesen ellátható igények a jövőben csak növekedni fognak.

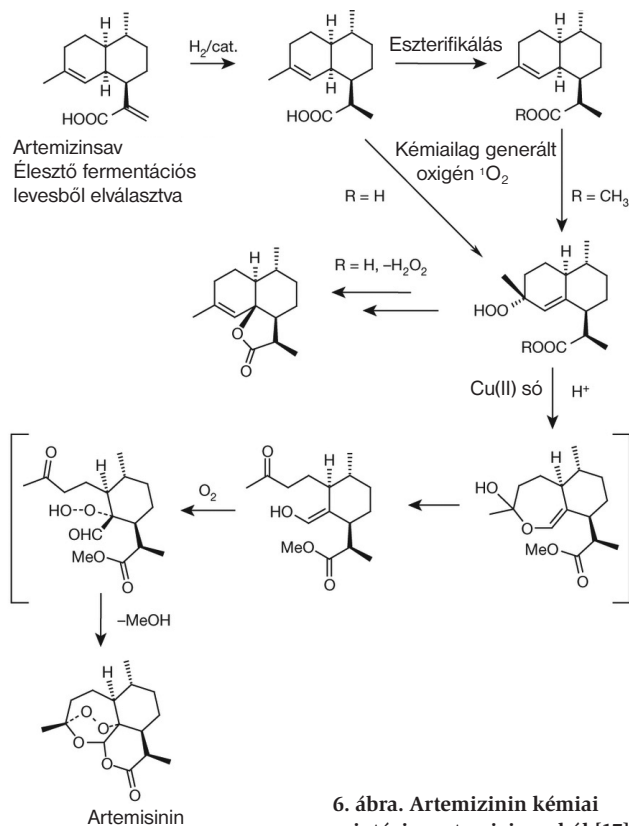
A fentebb vázolt helyzet ellensúlyozására a malária gyógyítása terén jelentős kutatások folynak új maláriaellenes gyógyszerek közvetlen kémiai szintézis útján való előállítására [9], sőt maláriaellenes oltások kifejlesztésén is dolgoznak [10], de ezek megjelenése még átfogó és hosszabb időt igénylő klinikai igazolásokra vár.

### Szintetikus biológiai, illetve biotechnológiai artemizinin-előállítás

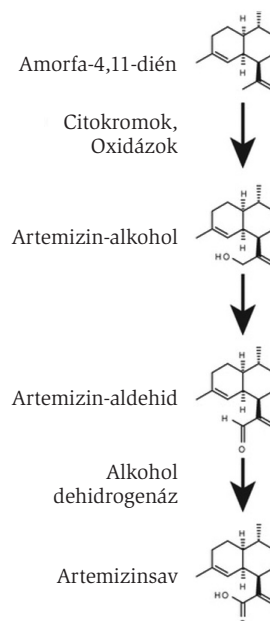
Hasznosnak láttuk ezen a ponton néhány fogalom etimológiai tisztázását. Ennek értelmében definíciószerűen szintetikus biológiának nevezik a biológiai szerkezetek és rendszerek tervezését és építését hasznos célok érdekében. Ez a biológiai kutatás és technológia ama területe, amely a biológiát és a mérnöki munkát kombinálja, gyakran átlapolva a biomérnöki és orvosi biológiai mérnöki területekkel. Magában foglal különböző megközelítéseket, metodológiákat és tudományágakat, amelyek a mérnöki munkára, a biológiára és a biotechnológiára fókuszálnak [11]. Ehhez még hozzá kell tenni, hogy egyes vélemények az egész területet vitathatónak tartják [12], sőt mások azt tapasztalták, hogy a szintetikus biológia definíciójára rákérdezve tíz megkérdőztet kutató tízféle meghatározást adott, de a legkimerítőbbnek azt tekintették, ami szerint a szintetikus biológia megteremtí azokat a szabványokat és protokollokat, amelyekkel az új biológiai funkciók tervezése és kialakítása kiszámíthatóvá, megbízhatóvá, hatékonyá és olcsóvá válik [13]. Jelen szerző ezek után a területet meglehetősen átfedőnek véli a biotechnológiával, illetve annak létrehozója, a magyar mérnök Ereky Károly által adott klasszikus definíció szerint: „*biotechnológia minden munka, amelynek segítségével alapanyagokból termékeket állítunk elő élő organizmusok segítségével*” [14].

Amivel a fentiek értelmében foglalkozni szeretnénk, az az artemizinin előállítását irányzó, 2006-ban bekövetkezett egyesült államokbeli áttörés [15].

Ugyan a hiányos és nem elegendő artemizinin-világtermelés növelését célzó kémiai szintézis gondolata már régebben is felmerült, sőt meg is valósították, kiderült, hogy kivitelezése bonyolult és drága [16]. Ezzel szemben a fent említett áttörés egy olyan úton indult, amely szerint az artemizinin félszintézise prekursor vegyületéből, a mikrobiális eredetű artemizinsavból anyagilag előnyös, környezetileg kedvező és jó minőségű terméket szolgáltat. E célból a közismert élesztőt (*Sacharomices cerevisiae*) vet-



6. ábra. Artemizinin kémiai szintézise artemizinsavból [17]



5. ábra. Artemizinsav szintetikus biológiai előállítása [17]

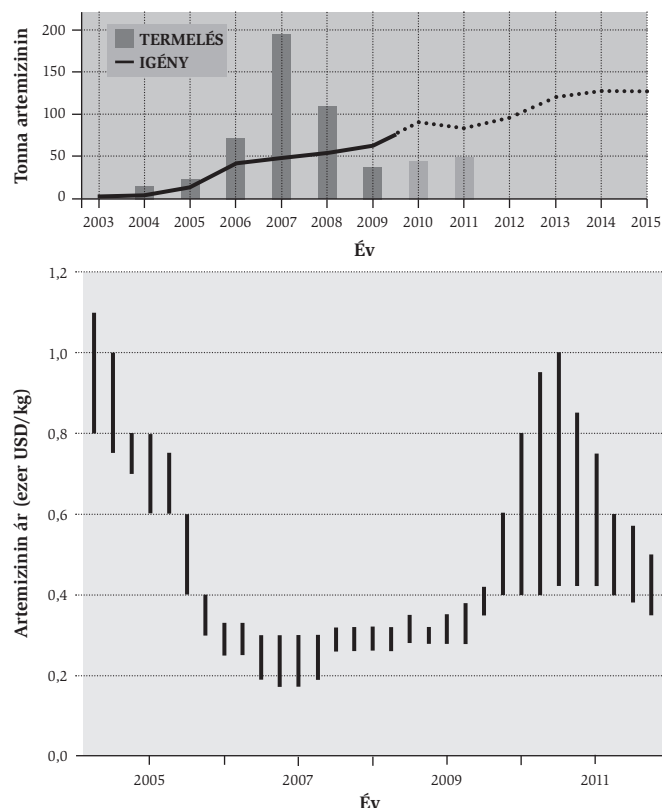
ték igénybe, amiből fermentálással jelentős mennyiségű artemizinsavat (körülbelül 100 mg/l) sikerült előállítani egy biotechnológiai mevalonát útvonal révén, amorfadién-szintáz és egy, az *Artemisia annua* növényből származó citokrom P450 monooxygenáz (CYP71AV1) igénybevételével, ami az amorfa-4,11-dién háromlépéses oxidálásával artemizinsavat eredményez. A bioszintetizált artemizinsav kiválik a feldolgozott élesztő felületén, és aránylag egyszerű tisztítás után kémiai szintézissel előállított artemizininhez vezet.

Itt kötelezőnek érezzük, hogy újra visszatérjünk a szintetikus biológia egyik jellemzéséhez, ami szerint az a természetben megfigyelhető mechanizmusokat próbálja reprodukálni, saját céljaira fordítani anélkül, hogy azok működését 100 százalékban megértse [13]. Ezek szemléletében kerülnek bemutatásra az 5. és a 6. ábrán a fentebb vázolt biológiai és kémiai szintézis lépései [15,17]. Mint már említésre került, 2009-re az artemizinin nyersanyaga, az *Artemisia annua* mezőgazdasági termelése már nem tudott lépést tartani a világszerte megnövekedett artemizinin-igényekkel, illetve a gyógyszer ára is emelkedni kezdett. Ez a 7. ábrán is jól követhető [18].

Ennek a helyzetnek az előrelátása során kezdett el a 2000-es évek elején Ray Kiesling [15,17] a Kaliforniai Egyetemen a szintetikus biológiai megoldással, illetve azzal foglalkozni, hogy a növényben jelen lévő gének és a mikrobiológiai fermentáció segítségével állítson elő artemizint. Ehhez a DNS szekvenálásával fel kellett fedezni az *Artemisia annua*-ban meglévő géneket, és utat találni azoknak a baktériumokba való beépítéséhez.



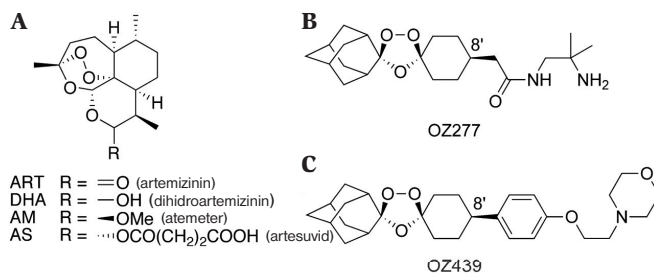
## Az artemizinin felfedezése



7. ábra. Az artemizinin termelése, igény és ár [18, 19]

lyek kémiai szintézise az artemizininénél egyszerűbb és olcsóbb. Ezek közé tartoznak a szintetikus ozonideknek nevezett artemizinszármazékok [21] (8. ábra), különösképpen az OZ439 kódnevvel ellátott vegyület.

A másik irány a jelenleg szintetikus biológiára, különösképpen a Kiesling által kezdeményezett, az élesztő fermentálására épített lehetőségek. Bár a biológiai gyógyszer-szintézist eredetileg finanszírozó alapítvány vezetője, Bill Gates hangsúlyozta, hogy nem biztos, hogy ez az olcsó artemizinin-termelést végleg megoldja, de az élelmiszeriparban a fermentálásra épített szintetikus biológiára biztos fényes jövő vár.



8. ábra. Artemizinin-származékok és ozonidek szerkezete [21].

A: artemizinin, B: dihidroartemizinin, C: OZ439

A gyógyszert addig gyártó Sanofi gyógyszergyár ugyan beleegyezett abba, hogy nagyjából gyártási áron forgalmazza a már említett CIA artemizinin-koktét, de a Kiesling által tervezett kutatáshoz nem akadt anyagi támogató. Ekkor jelentkezett a Bill és Melania Gates Alapítvány egy 42 millió dolláros támogatással. Ezzel indult el több helyen Kiesling vezetésével az artemizinin szintetikus biológiai előállításának kutatása, amit aztán ugyancsak a Kiesling által létesített start-up cég követett.

## Végszó

A jövőt tekintve a maláriaellenes gyógyszerek kutatása, illetve a malária gyógyászata világszerte több szinten és irányban folyik [20]. Ezek közül kettőt tartunk itt megjegyzésre érdemesnek. Az egyik irány az olyan vegyületekre vonatkozik, ame-

## IRODALOM

- [1] [http://www.who.int/malaria/world\\_malaria\\_report\\_2011/9789241564403\\_eng.pdf](http://www.who.int/malaria/world_malaria_report_2011/9789241564403_eng.pdf). World Health Organization. World Malaria Report, 2011
- [2] Braun Tibor, A qinghaosu (artemizinin) felfedezése, Természet Világa (2012) 143, 358.
- [3] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Artemisia\\_annua.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Artemisia_annua.jpg)
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Artemisinin#mediaviewer/File:Artemisinin.svg>
- [5] Ying Li, Qinghaosu (artemisinin): chemistry and pharmacology, Acta Pharmacologica Sinica (2012) 33, 1141.
- [6] S.Krishna, A.C.Uhlemann, R. K.Haynes, Artemisinins: mechanisms of action and potential for resistance, Drug Resistance Updates (2004) 7, 233.
- [7] <http://www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/ETC-artemisinin-synbio-case-study2014.pdf>
- [8] „Saving Live, Buying Time: Economics of Malaria Drugs in an Age of Resistance” National Academy of Sciences, 2004.
- [9] J.L. Vennerstrom et al., Identification of an antimalarial synthetic trioxolane drug development candidate, Nature (2004) 430, 900.
- [10] S.Hoffman, Save the children, Nature (2004) 430, 940.
- [11] [http://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic\\_biology](http://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic_biology)
- [12] <http://www.theguardian.com/global-development/poverty-matters/2013/apr/12/syn-thetic-malaria-compound-artemisia-farmers>
- [13] [http://www.medicalonline.hu/tudomany/cikk/mire\\_valo\\_a\\_szintetikus\\_biologia\\_](http://www.medicalonline.hu/tudomany/cikk/mire_valo_a_szintetikus_biologia_)
- [14] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Biotechnol%C3%B3gia>
- [15] D.K. Ro et al., Production of the antimalarial drug precursor artemisinic acid in engineered yeast, Nature (2006), 440, 940.
- [16] G. Schmid, W. Hofheinz, Total synthesis of qinghaosu, J. Am. Chem. Soc. (1983) 105, 624.
- [17] C. J. Paddon et al., High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin, Nature (2013) 496, 528.
- [18] R. Van Norden, Demand for malaria drugs soars, Nature (2010) 466, 672.
- [19] M. Peplow, Malaria drug made in yeast causes market ferment, Nature (2013) 494, 160.
- [20] A. C. Aguiar, E. da Rocha, N. de Souza, T. França, A. Krettl, New approaches in antimalarial drug discovery and development. A review, Memórias do Instituto Oswaldo Cruz (2014) 109, 631.
- [21] S. A. Charman et al., Synthetic ozonide drug candidate OZ439 offers new hope for a single-dose cure of uncomplicated malaria, Proc. Natl. Acad. Sci. (2011) 108, 4400.
- [22] J. J Moehrle et al., First-in-man safety and pharmacokinetics of synthetic ozonide OZ439 demonstrates an improved exposure profile relative to other peroxide antimalarials, Br. J. Clin. Pharmacol. (2013) 75, 524.
- [23] <http://arstechnica.com/science/2012/04/after-artemisinin-prospects-for-new-malaria-drugs/>
- [24] C. Barras, Anything plants can grow, New Scientist (2014) April, 34.



# Robotok és automatizálási robotika a kémiában és a kémia körül

## Előszó

Első megközelítésben figyelembe kell vennünk az „automata” (önműködő) és a „robot” szavak fogalmi rokonságát. Az automata a görög „spontán”-t, „önműködő”-t jelentő *automatosz* (αὐτοματος) szóból származik. A „robot” szót [1–3] a cseh *Karel Čapek* használta először 1921-ben megjelent *Rossum Universal Robots* (R.U.R.) című színdarabjában. A szó cseh, szlovák és lengyel nyelven szolgámként, oroszul munkát jelent. Állítólag *Čapek* eredetileg a cseh *labori* (dolgozók) szót akarta használni, de az nem igazán tetszett neki, így Józef bátyja javaslatára választotta a *robotot*. A továbbiakban itt mindig a robot fogalmát használjuk olyan értelmezésben, ahogyan az az automatizálást szolgálja, és ahogyan a következőkben definiáljuk.

## Bevezetés

Definíciószerűen robotnak tekintünk egy kinematikai értelemben használt, különböző számú szabadságfokokkal rendelkező, általában elektromos vagy más energiaforrással működtetett szerkezetet (gépet), amely előzetes programozás alapján képes különböző feladatok végrehajtására. Ez történhet közvetlen emberi irányítással, de egy robot önállóan is végezheti a munkáját számítógépes felügyelet alatt [4,5]. Robotokat általában olyan munkákra, feladatokra vesznek igénybe, amelyek túl nehezek vagy túl veszélyesek az ember számára, vagy egyszerűen túl egyhangúak, de nagy pontossággal végrehajtandók, és amiket egy robot az embernél sokkal nagyobb biztonsággal és megbízhatósággal képes elvégezni.

Robotikának nevezik a technológiának azt az ágát, amely robotok tervezésével, építésével, működtetésével, valamint ezek ellenőrzésére, érzékelési visszacsatolására és információfeldolgozására hivatott számítógépes rendszerekkel foglalkozik. Valószínűnek tartjuk, hogy a robot fogalma sokak képzetében a robotok humanoid (ember alakú), illetve antropomorf változatát veti fel, ezért már itt említjük, hogy e dolgozatban ezekre nem térünk ki. Ugyanez vonatkozik a robotika három alaptörvényére is (robot–ember kapcsolat).

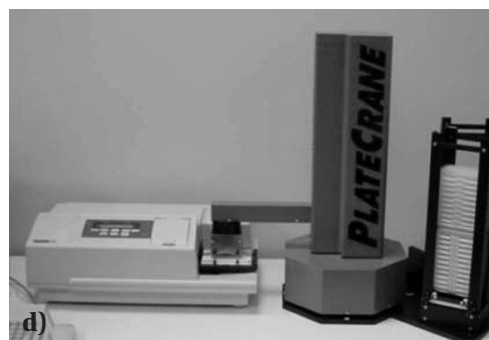
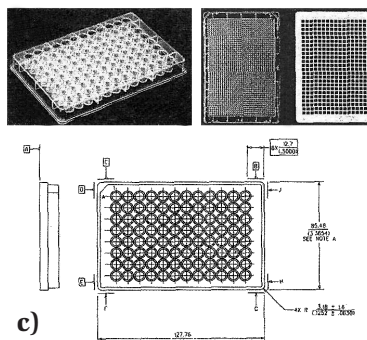
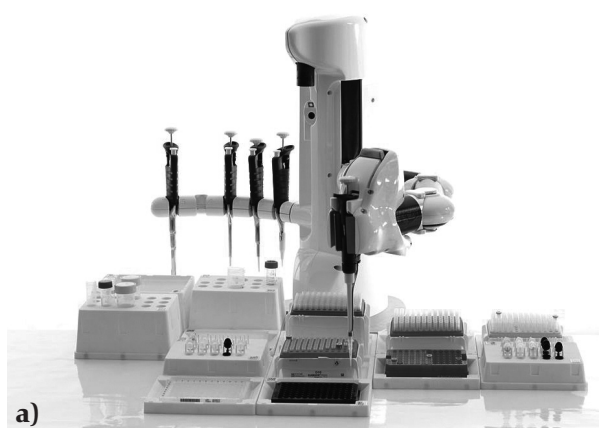
A robotokkal és a robotikával általában könyvtárnyi szakirodalom, vagy pontosabb adattal, több tízezer tételnyi internet cím-anyag foglalkozik. Ezért a témát most kizárólag a kémiai vonatkozásokra, a kémiából eredő, illetve a kémiát és a kémiai kutatást érintő és szolgáló területekre szűkítettük.

## Laboratóriumi robotok

Ebben a fejezetben kapcsolódunk egyik előző dolgozatunkhoz, amelyben az analitikai kémia miniatürizálását és az automatizálás legújabb eredményeit ismertettük, de robotok és robotika nélkül [6]. A mostani munka azonban kiterjed a kémia összes, illetve a kémiai kutatás lehetőleg minden olyan területére, amelyben laboratóriumi robotokat alkalmaznak, illetve alkalmazhatnak. Ilyenek elsősorban azok a kémiai műveletek, amelyekben naponta megismétlendő nagyszámú kémiai sorozatvizsgálatot és -mérést – nagy átbocsátóképességű szűrést – végeznek, amelyet az angol nyelv *HTS*-ként (azaz *High Throughput Screening*-ként) tart számon, például a környezetvédelemben, a klinikai laboratóriumi mérések, a mezőgazdasági és élelmiszer-vizsgálatok, a kémiai és gyógyszerkémiai vizsgálatok és szintézisek során. Úgy gondolják, hogy az egyesült államokbeli *Unimation Inc.* által 1961-ben szabadalmaztatott [7], majd *Unimate* néven gyártott ipari robotok voltak az első ilyen szerkezetek. Az általuk kiváltott ipari forradalom nyomán a kompakt mikroprocesszorokkal vezérelt és 1981-ben az egyesült államokbeli *Zymark* cég által elsőnek gyártott laboratóriumi robotok az iparihoz hasonló forradalmat hoztak létre a laboratóriumi vizsgálatokban [8,9]. A robotizált laboratóriumi egységeket általában *deck*, *platform* vagy *konfiguráció* néven tartják számon. Ezek az egységek természetesen számos elemből, műszerből (műszerdarabból) állhatnak össze, de összetételük lényegében folyadékkezelő és -továbbító, keverő, tároló, centrifugáló, melegítő, optikai és/vagy elektrokémiai, inkubáló stb. műveleteket végezni képes műszerekre és legfőképpen robotkarokra vonatkozik. Ilyen karok konfigurációs tipológiáját az **1. ábra** mutatja be. Az ábra szemlélteti az elektromos energiával üzemeltethető mechanikus robotkarok mozgásirányát, távolsági hatáskörét és 3D mozgásterét. A robotkarok a főtengelyük konfigurációjában különböznek a legmarkánsabban. A rotációs és transzlációs csuklók közvetlen sorba rendezhetősége révén ezeket kinematikai láncnak is tekinthetjük. Ilyen értelemben öt robotkartípust, azaz karteziánus, hengeres, szférikus és úgynevezett artikulált, azaz vízszintes és függőleges csuklókaros robotokat különböztetünk meg attól függően, hogy milyenek a sebességi, ismétlődési, pontossági, mozgástéri és súlyhordozási feladat szabta követelmények.

	Kartézianus	Hengeres	Szférikus	Vízszintes csuklós kar	Függőleges csuklós kar
Mozgásirány					
3D mozgáster, távolság					

1. ábra. Robotkarok konfigurációs tipológiája [8] (kiegészítve)



2. ábra. a) Folyadékkezelő mikrolapokkal működő kartézianus pipettázórobot [25]. b) 96 üreges mikrolap és pipetták [26]. c) 96, 384 és 1536 üreggel ellátott mikrolapok [19]. d) Mikrolaptornyokat mozgó segítőrobot [28]

A kartézianus robotkarok három lineáris szabadságfokkal (X, Y, Z) rendelkeznek, de a karok forogni nem tudnak. Ezek megfelelő programozással alapvetően laboratóriumokban, folyadékkezelési, mintavételi, illetve pipettázási feladatokat látnak el longitudinális mozgásterben.

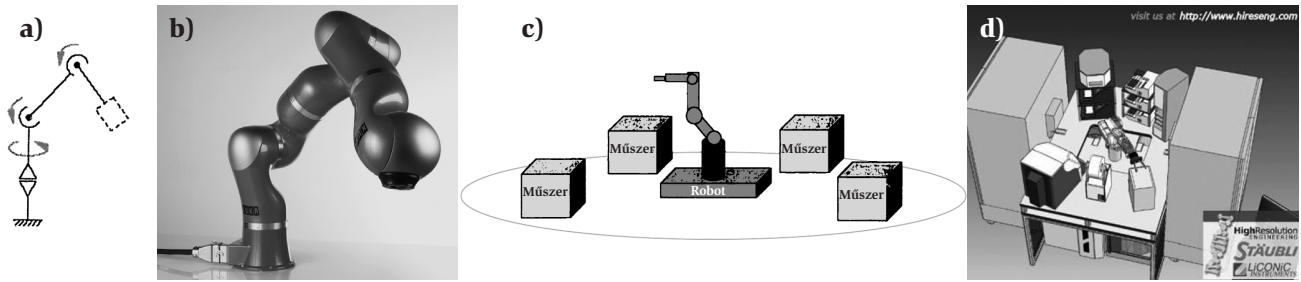
A hengeres robotkarokat négy szabadsági fokkal: alapban forgás, csuklóforgás, fel-le mozgás és oldalmozgás lehet használni.

Az 1. ábrán nem szereplő, úgynevezett együttes (joint) karos robotokat a legtöbb szabadsági fokú mozgási lehetőség jellemzi: váll, könyök, csukló, bólintó-forgó, lengőalapú. Megfelelő programozással bonyolult konfigurációk működtetése is megvalósítható, és erről alapos leírások is rendelkezésre állnak [9–12]. A részletek vázolására ezen a helyen nem nyílik lehetőség, de röviden szót kell ejteni a konfigurációkat vezérlő számítógépes szoftverekről és szoftvermodulokról, amelyek képesek koordinálni az 1. ábrán bemutatott komplex robotkar-mozgásokat. Szoftvermodul alatt általában olyan újraalkalmazható és független szoftverkomponenseket értenek, amelyek a konfigurációk bizonyos funkcióinak ellátására alkalmasak. Egy modul összhangban dolgozhat más modulokkal és együttesen összetett feladatok megoldására is alkalmasak lehetnek [13–17].

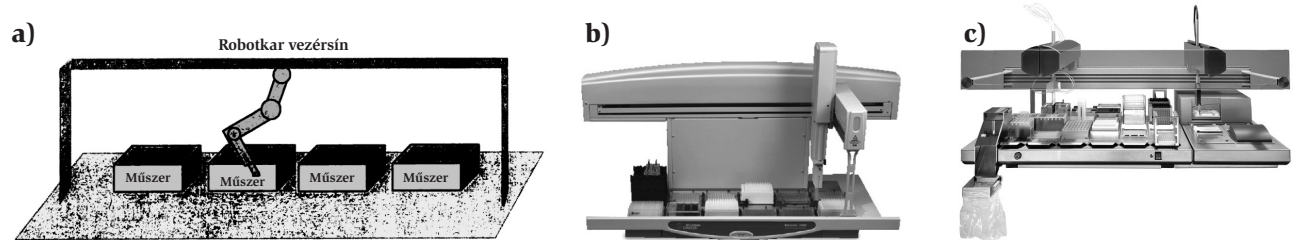
A laboratóriumi robotizált műveletek egyik leggyakrabban igénybe vett változatoként, mint említettük, a folyadékmozgatást, folyadékkezelést és -adagolást, illetve a pipettázást említhetnénk. Általános ismertetésként pipettázórobotot mutatunk be a 2.a ábrán [18]. A folyadékkezelést, -mozgatást, -tárolást általában különböző méretű kémcsövekben és más laboratóriumi edényekben végzik, de itt feltétlenül, kiemelten és hangsúlyozottan említést kell tennünk egy világraszóló magyar találmányról, a laboratóriumi mikrolemezről, amivel jelen szerző egy másik dolgozatban már foglalkozott [19]. A Takátsy Gyula inframikrobiológus által az 1950-es években megalkotott és a hatvanas években feltalált, de nem megfelelően szabadalmaztatott Mikrotitrátor berendezés tartozékának számító mikrolemezek [20] azóta is világszerte a laboratóriumi folyadékkezelés egyszerű, hatékony, gazdaságos és célszerű eszközei a modern mozgókaros laboratóriumi robotkonfigurációk csaknem mindegyikének nélkülözhetetlen velejárói, komponensei. Egészen röviden, a mikrolemez egy téglalap alakú öntött vagy préselt műanyag lap, amiben alapvetően nyolc sorban tizenkét (azaz összesen 96) henger alakú mélyedés van kiképezve, de 384 és 1536 mélyedéssel ellátott mikrolapokat is előállítottak (2.b–c ábra). A mikrolapok kémcsöveket helyettesítendő üregeiben a laboratóriumi folyadékkezelést [21–24], keverést, reagáltatást, melegítést, hűtést, optikai színmérést, de más analitikai értékelést, egyedi vagy sorozatmérést milliliternyi, illetve mikroliternyi folyadéktérfogatoknál és sorozatvizsgálatoknál is (array) egyaránt el lehet végezni.

A 2.d ábra olyan laboratóriumi robotrészt mutat be, amely a robotegységekben a mikrolapokat a sorozatvizsgálatok során műveletről műveletre (pl. adagolás, keverés, hőkezelés stb., végül mosás, tisztítás, szárítás) mozgatja. A laboratóriumi robotok valószínűleg egyik leggyakrabban alkalmazott változata az, amelyik vízszintes, illetve függőleges csuklós karokkal működik. A 3. ábra ilyen példát mutat be. A négy szabadságfokkal rendelkező kart az ábra hengeres konfigurációkban ábrázolja. A 4.a–c ábra egy decket csuklós karú kartézianus mozgásirányú robotkonfigurációként mutat be.

## Robotok és automatizálási robotika a kémiában és a kémia körül



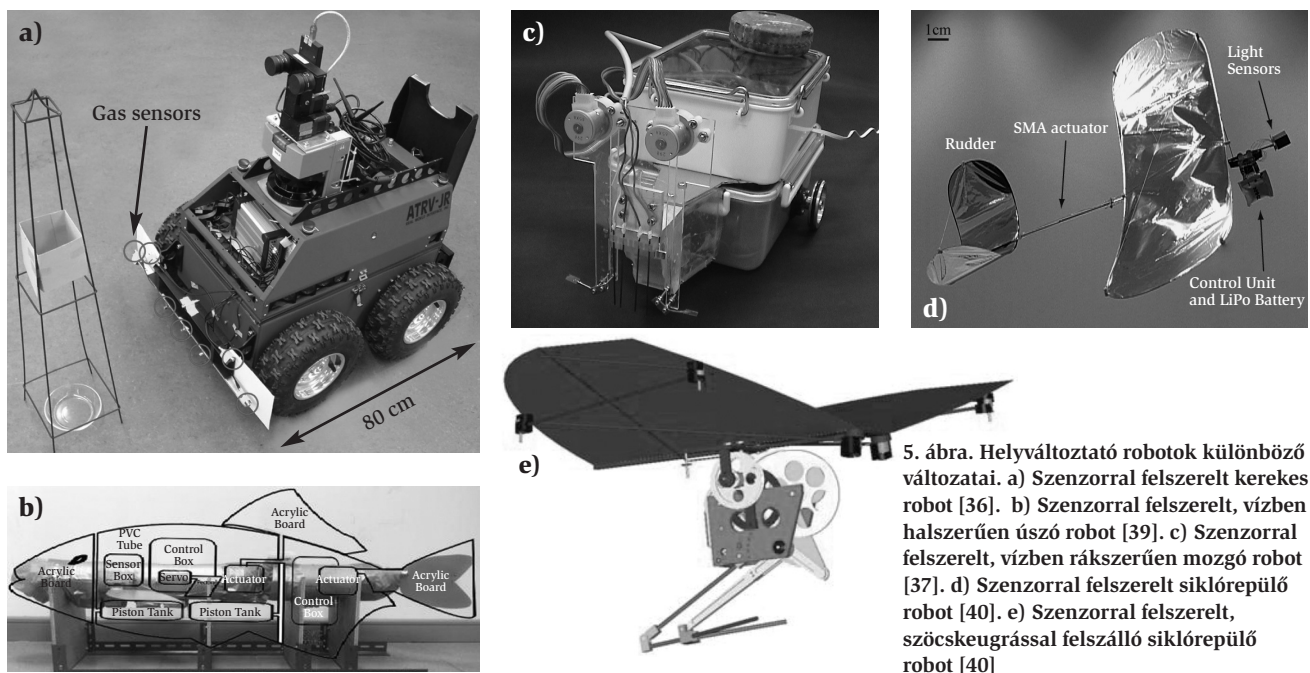
3. ábra. a) Csuklós robotkar sémája (l. 1. ábra). b) Csuklós robotkar [29]. c) Hengeres laboratóriumi robotkonfiguráció-séma [11]. d) Félhenger elrendezésű laboratóriumi robotkonfiguráció [30]



4. ábra. a) Csuklókaros karteziánus multifunkciós laboratóriumi robotkonfiguráció [11]. b) Biomek 3000 gyártmányú robotkar-vezérsín. c) Onyx (ALS Automated Lab Solutions) típusú, mikrolapokat alkalmazó laboratóriumi robotkonfiguráció [34]

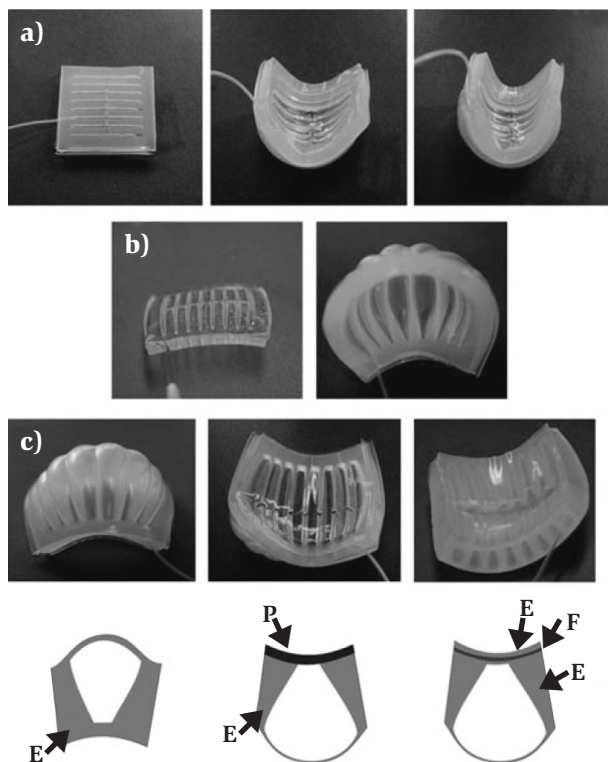
## Helyváltoztató robotok

Helyváltoztató robotnak nevezhetünk minden olyan robotberendezést, amely valamilyen formában és közegben egy adott pont-ról, valamilyen irányban, különböző távolságokra el tud mozogni, távolodni. A helyzetváltoztatás újabb mozgási szabadságfokot biztosít a robotoknak, ami változatosabb feladatokat, valamint hasonló vagy más szerkezetekkel való kölcsönhatásokat tesz lehetővé. A mozgáshoz három közeg jön számításba, amin vagy amiben a helyváltoztató robotok kifejtethetik tevékenységüket: talaj, levegő és víz. Mindhárom közegre kifejlesztettek olyan robotokat, amelyek ezekben a közegekben távvezérelve vagy előre beprogramozott módon különböző feladatoknak eleget tudnak tenni. Ezeket a robotokat rájuk szerelt vagy beléjük épített kémiai érzékelőkkel, szenzorokkal látják el olyan helyeken, anyagokkal való mérésekre, amelyek megközelítése, kezelése az emberre kockázatot jelentenének. A kémiai szenzorok számos változata jöhet a fentiek szerint számításba [35] a spektroszkópiát, az elektrokémiát, a radioaktivitást stb. beleértve, de ezekkel itt külön nem foglalkozunk. Ezzel szemben említést kell tennünk a levegőben és vízben mérendő környezetszennyezők, illetve különböző forrásokból eredő szennyezések robotikai megközelítéséről. Földi terepek megközelítésére kerekre, illetve hernyótalpas robotokra szerelt szenzorokat vettek igénybe (5.a ábra) [36].

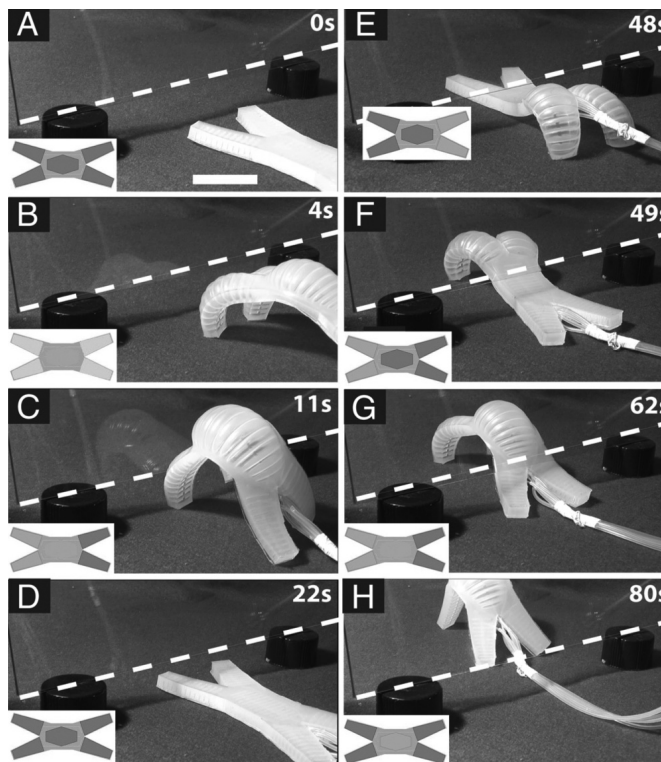


5. ábra. Helyváltoztató robotok különböző változatai. a) Szenzorral felszerelt kerek robot [36]. b) Szenzorral felszerelt, vízben halszerűen úszó robot [39]. c) Szenzorral felszerelt, vízben rákszerűen mozgó robot [37]. d) Szenzorral felszerelt siklórepülő robot [40]. e) Szenzorral felszerelt, szöcskeugrással felszálló siklórepülő robot [40]





6. ábra. Pneumatikus lágy elastomer robotikus elem (kar) mozgása nyomás alatt [41]. E: Ecoflex (sziloxán); P: polimetil-sziloxán (PDMS); F: poliészter szövetek. a) rugalmas elastomer robotelem mozgása nyomás hatására; b) balra: PDMS-ből kialakított robotelem teljes nyomás alatt; jobbra: ugyanaz Ecoflexből (sziloxán); c) különböző rétegvastagságú elastomerekből kialakított csatornák nyomás alatt



7. ábra. Elastomerből kialakított pneumatikus lágy robot átkúszása a fehér vonallal jelzett akadály alatt [42]

Vízes közegben hal formájú és úszó mozgásformát követő szenzorokkal ellátott robotokat, illetve a lassú mozgású vízi rákokra emlékeztető rákmobilitású berendezéseket alakítottak ki (5.b–c ábra) [37]. Hasonló módon és elképzelés alapján születtek különböző méretű és kialakítású repülő robotok, amelyeket kémiai szenzorokkal láttak el (5.d–e ábra). A legutóbbinál külön érdekesség, hogy – szintén állatvilági sugallatra – a repülő robot indítására a robotikus szöcskeugrást vették alapul a szenzorral ellátott apró légi jármű levegőbe emelkedéséhez.

A fent említett robotok által főleg vízben és/vagy levegőben eredményesen keresett, szennyező és más káros anyagokból kialakuló szennyező csóvák detektálására [38], illetve lokalizálására fluidmechanikai tényezőket is messzemenően tekintetbe kellett venni. Ez irányban megoldást ígér és ígért megfelelő guruló, úszó, repülő *robotrajok* bevetése. [37]

## Pneumatikus működtetésű, lágy karú robotok

A fentebb leírt robotok elektromos működtetésű kemény robotkarokkal látták el feladatukat. Külön említést érdemelnek azok a szerkezetek, amelyek a biomimetikát vagy mimikrit [42] veszik igénybe a robotok mozgatásához. Biomimetikának tekintik a természet modelljeinek, elemeinek és rendszerének utánzását komplex emberi problémák megoldására. Ezeknek a modelleknek az eredete elsősorban az állatvilágban lelhető fel, például az állatok szárnyai, lábai és más mozgási tulajdonságai (például kúszás) lágy vagy merevített helyzetben. De tipikus karszerű aktuátornak tekinthetők az evolúció során kialakított izmok is. Jelenleg nincsenek még olyan szerkezetek, amelyek teljesen utánózni tudnák az izmok funkcióit és mozgatási teljesítményét.

Pneumatikusan működtetett lágy (rugalmas) robotok alkalmasnak mutatkoztak különböző geometriai formájú tárgyak markolására és mozgatására makro-, mikro- vagy nanoskálán [41]. Különböző rugalmasságú anyagokból (például polimerek) álló szerkezetek alkalmasak számos érintésre kényes vagy törékeny tárgy, például élelmiszerek (tojás, gyümölcsök) simulékony, lágy markolására. Említésre érdemes egy elastomerek pneumatikus csatornáiból kialakított konstrukció használata aktuálásra (mozgatásra) gömbszerűen vagy hurkaszerűen felfújható formában. Az elastomer anyagok összetétele, valamint a csatornák formája meghatározhatja, sőt szabályozhatja a robotszerkezet válaszát az alkalmazott pneumatikai nyomásra. Bizonyos mozgatási amplitúdó kialakíthatóságát, illetve skálázhatóságát az alkalmazott anyagok merevsége vagy rugalmassága határozza meg.

A 6. ábra két elastomerből, azaz sziloxánból (Corning) és polidimetil-sziloxánból (PDMS, Sylgard 184) megfelelő CAD (Computer Aided Design) szoftver alkalmazásával, illetve 3D nyomtatással kialakított pneumatikai robotikai mozgatóelemet mutat



be. Megfelelő nyomás alá helyezve (14 kPa) a merevebb anyag derékszögűen kialakított szelvényei körülbelül 15 cm-es görbülést tudtak elérni. Lágyabb, rugalmasabb elasztomerből kialakított hasonló idom körülbelül 1,5 cm görbülésre képes [41]. A fentebb ismertetett elasztomerekből kialakított pneumatikus kúszó-mászó lágy robot hullámzó mozdulatokkal akadály alatt is át tud kúszni, ahogy a **7. ábrán** látható. [42] A leírt elasztomerekből megépíthető például egy pneumatikus csillag alakú robottenyér is törékeny tárgyak (például tojás) mozgására (markolására) (**8. ábra**).

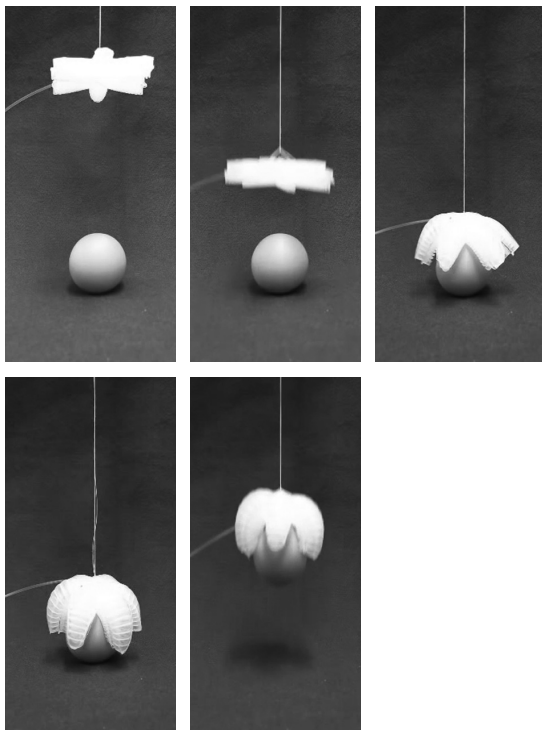
Ugyancsak a biomimetikából [43], illetve hernyók, vagy más lágy testű állatok példájából kiindulva, amelyek mozgását a testüket körülölelő izomcsatornában áramló elasztofluidumok látják el, merült fel a speciális textilszállakkal borított elasztomer csövek robotkarokként való alkalmazásának gondolata [44]. A két vagy három textilszállal körülvett elasztomer csövek mozgását robotkarként a bennük áramló fluidumokkal (gáz vagy folyadék) lehet szabályozni (**9. ábra**). Mint az ábrán látható, egy ilyen robotkar különböző irányú mozgásokra képes, belülről markolva például kis- és nagyméretű csővezetékek mozgására, emelésére nyújt lehetőséget.

A pneumatikus mozgató lágy robotszerkezetek „függetlenítése” érdekében újabban palackból származó sűrített gázok helyett már egybeépítésre alkalmas gázgenerátorból, például a hidrogén-peroxid elektrolízises bomlásából származó oxigént is igénybe vették [45].

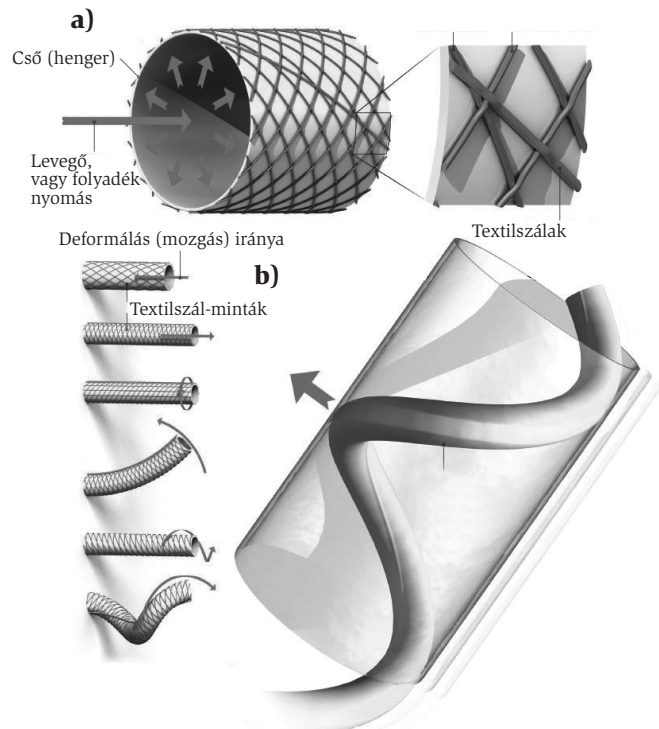
### Kémiai energiát mechanikai energiává alakító polimer gélszerkezetek robotikai reményei

Már a múlt század közepén ismertté váltak olyan vizsgálatok, amelyek során bizonyos polimer szerkezetek úgynevezett „kémiai izom”-szerűen kémiai környezetüktől függően voltak képesek méretváltozásra [47–50]. Egyetlen tipikus példaként említjük a polivinil-alkoholt (PVA) és a poliakrilsavat (PAS), amely ozmotikusan a polimer belsejében lévő ionkoncentrációtól függően duzzad, illetve zsugorodik. Ezt elsősorban a gyenge karboxilcsoportok ionizálása okozza. Amikor a körülvevő oldat savas, akkor a disszociáció foka alacsony, és a polimer zsugorodik. Lúgos oldatban a polimer duzzad. Ezt annak idején „pH-izomnak” is nevezték.

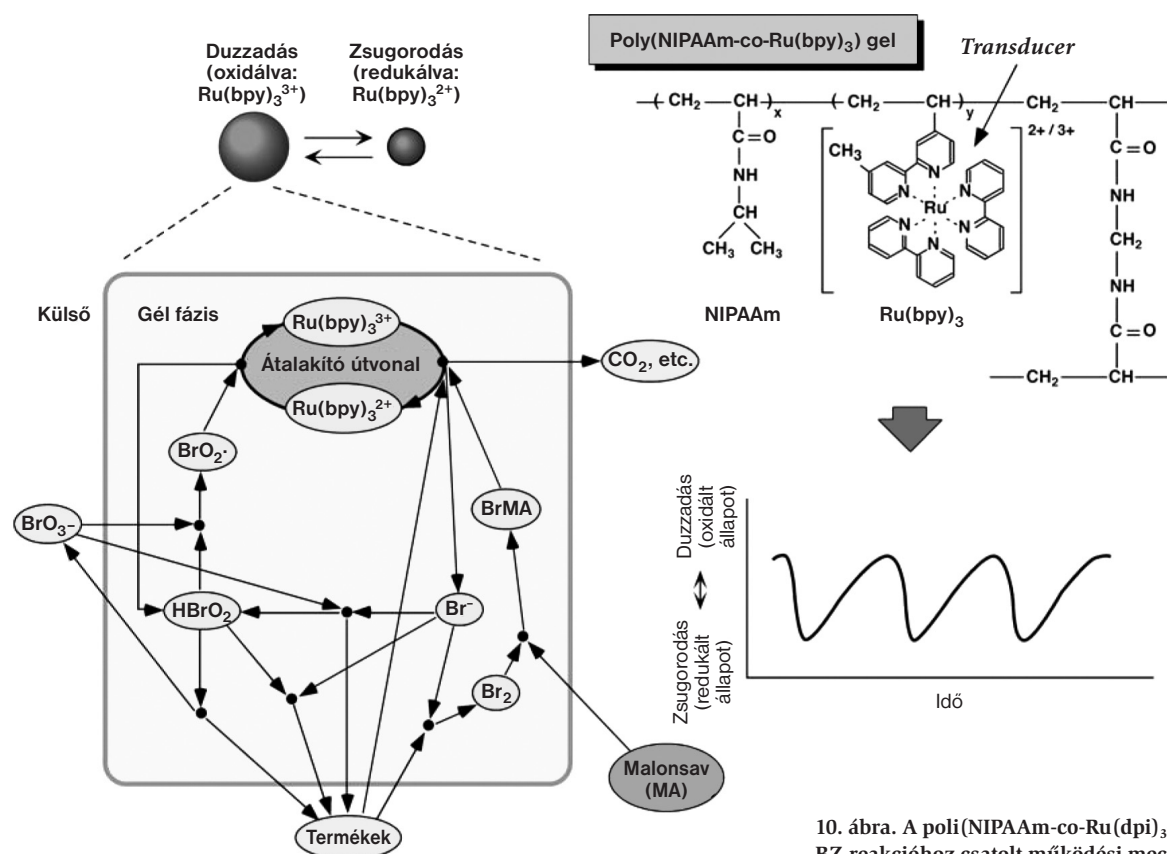
A különböző próbálkozások közül, jelen szerzőnek, a *Belouszov és Zsobotyinszkij (BZ)* által felfedezett oszcillációs reakció tűnik a legeredményesebbnek a polimer gélek mozgására. Annál is inkább, mert a reakció FKN akronimmal (*Field, Körös, Noyes*) elhíresült kémiai mechanizmusának kidolgozásában a magyar *Körös Endre* is jelentős szerepet játszott [51]. A BZ-reakció általános folyamata egy szerves vegyület (szubsztrátum), például malon- vagy citromsav oxidálószerrel (bromiátion) való oxidálása erős sav és fémkatalizátor jelenlétében. Amikor az oldatot homogén módon keverik, színe – például neoncsőhöz hasonlóan – periodikusan változik a katalizátor redoxváltásainak hatására. Amikor az oldat stacioner állapotban vékony réteggé helyezkedik el, koncentrikus spirális hullámszerkezet alakul ki benne. Az oxidált állapotban állandó sebességgel terjedő hullámot kémiai hullámnak is nevezik.



**8. ábra.** Csillag alakú pneumatikus robottenyér, például tojás gyengéd markolására [46]

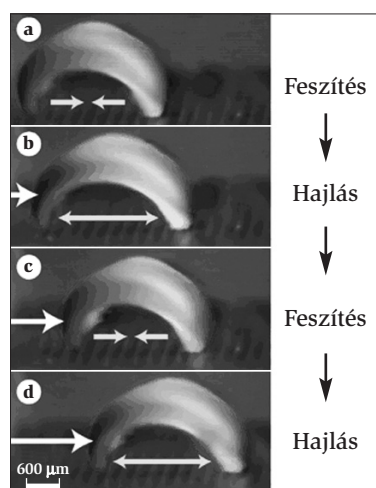


**9. ábra.** Fluidum- (gáz, folyadék) mozgató cső alakú robotkarok [44]



A BZ-reakció kémiai oszcillációját kísérelték meg gélek mechanikai mozgásra változtatni, illetve felhasználni, külső, nem oszcillációs feltételek közötti autonóm dagadási-zsugorodási oszcilláció létrehozásával. A kopolimer gél NIPAAm-ból (N-izopropil-akrilamid) és ruténium-trisz-2, 2'-dipivdíl-Ru-(dpi)<sub>3</sub><sup>2+</sup>-ből készült. A BZ-reakcióban katalizátorként ható Ru(dpi)<sub>3</sub><sup>2+</sup> a NIPAAm-láncokhoz kötődik (10. ábra). A poli(NIPAAm-co-Ru(bpi)<sub>3</sub><sup>2+</sup>) gél a NIPAAm hőérzékenysége folytán bizonyos hőmérsékleten fázisátalakulást mutat. A Ru(dpi)<sub>3</sub><sup>2+</sup> rész nemcsak a gél duzzadási fokának növekedését okozta, hanem a fázisátalakulás hőmérsékletét is növelte. A jelenséget a polimer láncok hidrofilitás-növekedésével magyarázzák, amit a Ru(dpi)<sub>3</sub><sup>2+</sup> részben a Ru(II) Ru(III)-má alakulása okoz. Ennek megfelelően a gél ciklikus duzzadást-zsugorodást szenved, amikor a Ru(dpi)<sub>3</sub><sup>2+</sup> rész állandó hőmérsékleten periodikusan oxidálódik és redukálódik.

Amikor a gél a BZ-reakció összetevőit (malonsav, bromát, oxidálószer), de katalizátort nem tartalmazó oldatba merül, az összetevők behatolnak a polimer hálózataiba, és a katalizátor hozzáadásakor a BZ-reakció beindul a gélben. Ennek következtében a BZ-reakció által okozott periodikus redoxváltozások (oszcillációk) a gélben is periodikus duzzadási-zsugorodási változásokat okoznak [52, 53]. Az így kialakult gél-aktuátor hernyószerű mozgást tud végezni minden külső stimulus vagy energiaforrás nélkül. Az autonóm mozgást az oszcillációs reakció kémiai energiája hozza létre a gél belsejében. Kapcsolási mechanizmus által vezérelve a gél például lépegetni is tud a folyamatos duzzadás-zsugorodás, illetve feszítés-hajlás következtében (11. ábra).



**11. ábra. BZ-reakció alapján lépegető kémiai aktuátor gél (robot) [55]**

## Utószó

Szót kell ejtenünk végül a nanorobotikáról [54], amely érinti a dolgozat témáját. Úgy véljük azonban, hogy ez a nanoméret miatt sem tartozna szervesen a fentiekben ismertetettekhez, másrészt bár a nanorobotika vitathatatlanul megjelenik a kémiában is, a nanorobotok működési területe inkább az emberi szervezet, és a nanorobotika főként a nanomedicinához tartozik.

Legvégül fel kell vetnünk természetesen azt a kérdést is, hogy beszélhetünk-e egyáltalán „kémiai robotikáról”, vagy kémiai robotokról, mint a kémia többé-kevésbé külön szakterületéről. Válaszként valószínűleg az igen és a nem is egyaránt megadható. A „kémiai robotika” az aránylag közeli jövőben is jelentős fejlődésre számíthat. Nem feltétlenül a laboratóriumi robotok és robotika fejlesztései jelennek majd meg az ipari robotika területén, hanem inkább fordítva. A kémiában hasznosítható robotok gyorsasága, meg-

## Robotok és automatizálási robotika a kémiában és a kémia körül

bízhatósága és pontossága így minden bizonnyal növekedni fog. Jelentős fejlődés várható a szoftverek és szoftvermodulok terén is. Mint láthattuk, a pneumatika és a kémiai energia igénybevétele az elektromos energia pótlására, illetve helyettesítésére, robotkarok, robotelemek működtetésére is érdekes kezdeti eredményeket tud felmutatni, de feltétlenül megjegyzendő, hogy e területek még fejlődésük elején járnak.

### IRODALOM

- [1] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Robot>
- [2] [http://es.wikipedia.org/wiki/Aut%C3%B3mata\\_\(mec%C3%A1nico\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Aut%C3%B3mata_(mec%C3%A1nico))
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Automation>
- [4] E. L. Safford, Handbook of advanced robotics, Blue Ridge Summit, PA: Tab. Books, 1982.
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Robotics>
- [6] Braun Tibor, Miniaturizálás és automatizálás az analitikai kémiában, Magy. Kém. Lapja (2012) 67, 330.
- [7] G. C. Devol jr., U.S. Patent 2.988.237 (1961)
- [8] J. C. Boyd, Robotic laboratory automation, Science (2002) 295, 517.
- [9] R. A. Felder, J. C. Boyd, K. Margrey, W. Holmen, J. Savory, Robotics in the medical laboratory, Clin. Chem. (1990) 36, 1534.
- [10] G. D. Owens, R. J. Eckstein, T. P. Franz, Laboratory robotics, past, present, and future, Microchim. Acta (1986) II, 15.
- [11] J. C. Boyd, R. A. Felder, J. Savory, Robotics and the changing face of the clinical laboratory, Clin. Chem. (1996) 42, 1901.
- [12] T. Chapman, Lab automation and robotics: Automation on the move, Nature (2003) 421, 661.
- [13] SINS integration software for laboratory automation, Beckman Coulter, Fullerton, US, 1998.
- [14] C. Szyperski, D. Grunz, S. Maurer, Component software, Addison-Wesley, New York, 2002.
- [15] T. Batterman, Anwendung von Microsoft Softwarestandards in der Automatisierungstechnik, Expert-Verlag, Renningen, 2002.
- [16] R. L. Deming, L. A. Young, Laboratory computer networking, Sci. Comput. Autom. (1989) 5, 21.
- [17] American Society for Testing and Materials. Specifications for transferring of information between clinical instruments and computer systems, E1394-91, ASTM, Philadelphia, 1988.
- [18] [http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid\\_handling\\_robot](http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_handling_robot)
- [19] Braun Tibor, Egy itthon méltatlanul kezelt magyar találmány: A Takátsy-mikrotitrátor és laboratóriumi mikrolap világsikere, Magyar Tudomány, megjelenés alatt.
- [20] Gy. Takátsy, Die Verwendung des Mikrotitrator-Gerätes zu serologischen Untersuchungen (1964) 10, 293.
- [21] <http://www.ddw-online.com/enabling-technologies/p92824-the-microplate-market-pastpresent-and-futurespring-09.html>
- [22] S. Decker, Necessity is the mother of invention, Labor-Fachzeitschrift (2004) 12, 1120.
- [23] J. N. Little, A. Proulx, J. Counelly, Recent advances in robotic automation of microplate assays, Lab. Inf. Manag. (1994) 26, 89.
- [24] [http://en.wikipedia.org/wiki/Microtiter\\_plate](http://en.wikipedia.org/wiki/Microtiter_plate)
- [25] [http://en.wikipedia.org/wiki/Laboratory\\_robotics](http://en.wikipedia.org/wiki/Laboratory_robotics)
- [26] <http://www.hgpaauction.com/used-laboratory-equipment/>
- [27] [http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Featured-Articles/Robots-for-Life-Laboratory-Medical-and-Life-Science-Applications/content\\_id/605](http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Featured-Articles/Robots-for-Life-Laboratory-Medical-and-Life-Science-Applications/content_id/605)
- [28] <http://msuweb.montclair.edu/~olsenk/robot.htm>
- [29] [http://www.metal-supply.com/announcement/view/7193/kuka\\_roboter\\_is\\_presenting\\_a\\_new\\_robot\\_generation\\_at\\_automatica\\_2010#.U4RYmnJ\\_tLA](http://www.metal-supply.com/announcement/view/7193/kuka_roboter_is_presenting_a_new_robot_generation_at_automatica_2010#.U4RYmnJ_tLA)
- [30] <http://msuweb.montclair.edu/~olsenk/robot.htm>
- [31] Tömösközi Sándor, Élelmiszeranalitika gyors és automatizált módszerei, BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Digitális tankönyv, Budapest, 2011.
- [32] [www.medicaexpo.com642x472](http://www.medicaexpo.com642x472),
- [33] Lab automation and proteomics, Nature Biotechnology (2004) 22, 119.
- [34] <http://www.als-jena.de/liquidhandling.html>
- [35] A. Hulanicki, S. Glab, F. Ingman, Chemical sensors, definition and classification, Pure Appl. Chem. (1991) 63, 1247.
- [36] A. J. Lilienthal, A. Loutfi, T. Duckett, Airborne chemical sensing with mobile robots, Sensors (2006) 6, 1616.
- [37] M. Ohashi, Y. Kagawa, T. Nakatsuka, H. Ishida, Crayfish Robot That Generates Flow Field to Enhance Chemical Reception, J. Sensor Technol. (2012) 2, 185.
- [38] D. F. Spean, D. R. Thayer, D. V. Zarzhinski, Foundations of swarm robotic chemical plume tracing from a fluid dynamics perspective, J. Intell. Com. Cyber. (2008) 2, 745.
- [39] <http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/2013/1-teamcreatesr.jpg>
- [40] <http://lis2.epfl.ch/CompletedResearchProjects/SelfDeployingMicroglider/>
- [41] F. Ilievski, A. D. Mazzeo, R. F. Shepherd, XinChen, G. M. Whitesides, Soft robotics for chemists, Angew. Chem. Int. Ed. (2011) 50, 1890.
- [42] R. F. Shepherd, F. Ilievski, W. Choi, S. A. Morin, A. A. Stokes, A. D. Mazzeo, X. Chen, M. Wang, G. Whitesides, Multigait soft robot, PNAS, <http://www.pnas.org/content/early/2011/11/21/1116564108.full.pdf+html>
- [43] <http://en.wikipedia.org/wiki/Biomimetics>
- [44] S. Kota, Shape-shifting things to come, Scientific American (2014) May, 46.
- [45] <http://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/images/8/81/Onal-ISRR-2011.pdf>
- [46] <http://gmwgroup.harvard.edu/research/index.php?page=23>
- [47] W. Kuhn, B. Hargitay, A. Katchalsky, H. Eisenberg, Reversible Dilation and Contraction by Changing the State of Ionization of High-Polymer Acid, Nature 165, 514–516, <http://www.nature.com/nature/journal/v165/n4196/pdf/165514a0.pdf>
- [48] R. P. Hamlen, C. E. Kent, S. N. Shafer, Electrolytically Activated Contractile Polymer, Nature (1965) 206, 1141.
- [49] Z. Hu, X. Zhang, T. Li, Synthesis and application of modulated polymer gels, Science (1995) 269, 525.
- [50] A. Sidorenko, T. Krupetkin, A. Taylor, P. Fratzl, J. Aizenberg, Reversible switching of hydrogel-actuated nanostructures into complex micropatterns, Science (2007) 315, 487.
- [51] R. M. Noyes, R. Field, E. Körös, Oscillations in chemical systems, J. Am. Chem. Soc. (1972) 94 (4), 1394–1395.
- [52] R. Yoshida, Design of self-oscillating gels and application to biomimetic actuators, Sensors (2010) 10, 1810.
- [53] S. Mazda, Y. Hara, S. Nakamaru, Chemical Robots in Biomimetics, L. Pramatarova (Ed.) InTech Publ., Shanghai, 2011.
- [54] <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanorobotics>
- [55] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.200700625/abstract>

# Miniatürizálás és automatizálás az analitikai kémiában

## Lépések a kémcsőtől az integrált mikrofluidikai laborkártyáig vezető úton

### Bevezetés

Számos alapvető mű bizonyítja meggyőzően, hogy az analitikai kémia empirikus módszertanból elismert és fontos tudománnyá fejlődött (itt csak néhány munkát említenénk [1–3]).

A 19. század elejétől az analitikai kémia tárgyát elsősorban olyan kémiai reakciókra alapozták, amelyek az elemek, funkciók csoportok és később molekulák azonosítására és kvantitatív meghatározására vonatkoztak. Később kezdett az érdeklődés a kémiai jelalakítások felé fordulni, hogy elektromos, mágneses vagy optikai jelekben tükrözhesék a kémiai összetételt; valamint az olyan stratégiák felé, amelyek komplexkémiai összetételek elválasztására alkalmazhatók. Mindez elvezetett a műszeres analitika [4] kialakulásához, ami már alkalmassá vált a kémiai minták jelentős komplexitású és érzékenységgű mérésére és ellenőrzésére, valamint utat nyitott és nélkülözhetetlenné vált a kémia, ipar, környezet, klinikai diagnosztika, minőség-ellenőrzés minden területén.

A modern analitikai laboratóriumok műszerezettség fejlettségét és fejlődését látva és figyelve meglepően hat, hogy ezen laboratóriumokban főleg az elemzendő, feldolgozandó minták előkészítéséhez és folyadékok kezeléséhez használt üveg- és mérőedények formája, térfogata és jellege a 20. század második feléig számított 200 év alatt alig változott az analitikai oldatkezelések során, mint az az **1. ábrán** bemutatott klasszikus analitikai tankönyv címlapján és egy mai laboratóriumi üvegárut forgalmazó cég katalógusából vett példán látható.

A 20. század közepére az analitikai kémia fejlődése vezetett oda, hogy a fentebb felsorolt területeken százmilliós, sőt milliárdos nagyságrendre terjedt a világszerte analizálandó minták száma. A nagyságrend érzékeléséhez példaként gondoljunk csak a világszerte és naponta elvégzett és az orvosi diagnosztikában nélkülözhetetlen klinikai analitikai laboratóriumi (vér, vizelet) vizsgálatokra és a minőségellenőrzés, környezetvédelem, mezőgazdaság stb. által támasztott hasonló kívánalmakra.

E helyzet hozta létre az egyre sokasodó analitikai oldatok kezelése nyomán óhatatlanul felmerült olyan igényeket, mint:

- a minták feldolgozásánál használt vegyszerek, reagensok térfogatának és a laboratóriumi berendezések helyigényének csökkentése;
- az elemzések gyorsítása, azok számának növelése;
- az elemzések automatizálása.

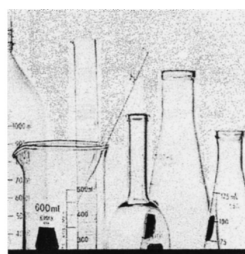
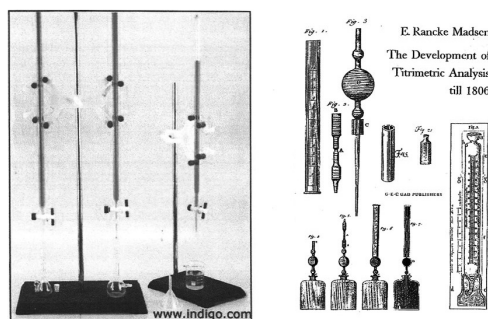
Az említett igények kielégítésére vezették be például az oldatkezelő eszközök miniatürizálását, és az ezzel együtt járó sorozatanalitikai és analitikai folyamatos, automatizált méréseket, elemzéseket. Ez a terület hatalmassá nőtt és átfogó bemutatására e helyütt lehetetlen lenne igényt tartani. Jelen dolgozat csak azokat a lépéseket kísérli meg vázolni, amelyek a címben említett terület kialakulásához vezettek.

### Első lépés a miniatürizálás felé vezető úton

#### Az egyedi minták feldolgozásától a sorozatos mintaelemzésig

Az analitikai sorozatelemzések (array) és az eszközök méretcsökkentése felé tett első lépés hazánkhoz és egy magyar kutató nevéhez és találmányához köthető.

Takátsy Gyula inframikrobiológus, influenzakutató 1951-ben a *Kísérletes Orvostudomány* című hazai folyóiratban cikket publikált „Új módszer sorozatos hígítások gyors és pontos elvégzésére” címmel [5]. A módszer lényegében az influenzavírus-teszt



**1. ábra.** Analitikai kémiai térfogatmérő edények és eszközök időbeli változatlansága



során kémcsövekben addig elvégzett hígítási szerológiai titrálásnak [6] nevezett eljárást<sup>a</sup> kívánta egyszerűsíteni és gyorsítani azáltal, hogy téglalap alakú plexiüveg lapon 12 sorban fűrt 96 mélyedéssorozattal (üreges mikrolappal) helyettesítette az addig használt egyedi kémcsöveket, és a hígítást pipettázás helyett platinadrótból gömbölyűre kialakított „spirálkacsokkal” végezte (**2. ábra**). Ha a kacsokat folyadékba mártották, a folyadék megtöltötte őket, és a felületi feszültség a felvett folyadékot a kacsban akkor is megtartotta, ha azt a folyadékból kiemelték. Említett dolgozatában Takátsy az üreges mikrolapok alkalmazásával megvalósította a minták térfogatának körülbelül egy nagyságrendi csökkentését, valamint elsőnek a világon eszközt talált fel és javasolt analitikai sorozatminták párhuzamos gyors feldolgozásához.

Takátsy valószínűleg tudatában volt találmánya forradalmi jellegének és a klinikai analitikai és más laboratóriumi mérések fejlődésére hatást gyakorolható korszakalkotó jelentőségének. Azonban az akkori időkben (1950-es évek) a hazai tudományos kutatás eredményeinek külföldön és idegen nyelven való publikálási tilalma miatt cikkét más nyelven nem publikálhatta.

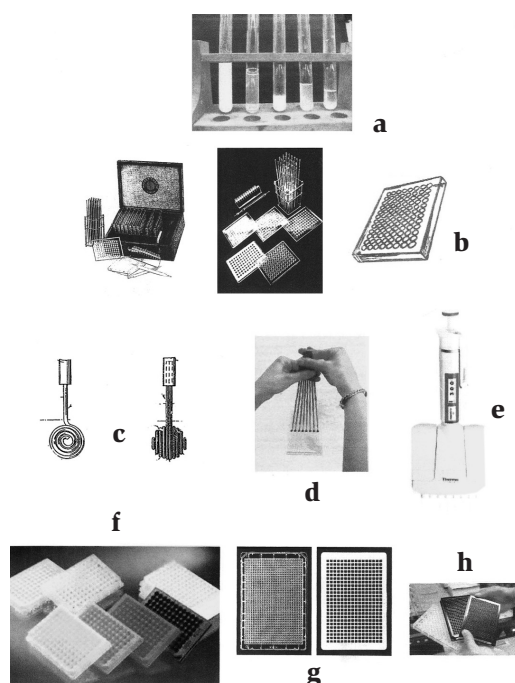
Cikkével egy időben Takátsy az akkori Országos Találmányi Hivatalnál szabadalmi igényt is bejelentett. Azt azonban a Hivatal 1951. évi június 14-i döntésében a népgazdaság szempontjából tekintett kis jelentőségre hivatkozva visszautasította. Az eljárást és az arra alapozott készletet, a Takátsy-féle mikrotitrátort (**2. ábra**) az 1960-as évek második felében az esztergomi Labor Műszeripari Művek gyártani, és itthon, valamint a Metrimpex Külkereskedelmi Vállalattal együttműködve külföldön is forgalmazni kezdte. Jelen írás szerzője, a Metrimpex Külkereskedelmi Vállalat felkérésére, más laboratóriumi műszerekkel együtt több nagy műszeripari nemzetközi kiállításon (Párizs, Bazel, Frankfurt/M) a külföldi érdeklődőknek használatban is bemutatta a mikrotitrátort. Takátsy Gyula, többszöri újabb elutasítás után, a mikrotitrátorra 1963. május 7-én szabadalmi oltalmat kapott, azonban annak más országokra való kiterjesztését, illetve érvényesítését a Labor Műszeripari Művek hanyag kezelés, illetve oda nem figyelés miatt elmulasztotta. Ezáltal a mikrotitrátor elve és maga a műszer külföldi (nyugati) országok műszergyártóinak szabad koppintási prédájává vált [7].

Közvetlen következményként az Egyesült Államokban 1962-ben az „Application of a Microtechnique to Viral Serological Investigations” [8] című cikkében a szerző jelentéktelen módosítással sajátjaként írta le a mikrotitrátort elvét. A cikk összefoglalója például a következő mondattal kezdődik: „A microtechnique (modified Takátsy) is described which can be applied to complement fixation, hemagglutination, hemagglutination, inhibition and metabolic inhibition tests.” A Takátsy-féle gondolat és megvalósítás alapján világszerte számos cég kezdte el gyártani a kémcsöveket helyettesítő, különböző számú és őrztartalmú üregekkel ellátott titrálási műanyag mikrolapokat (**2.f,g,h ábra**), és gyártja milliós számra ma is. Ezek használata nem csak a klinikai sorozatanalitikát [9] forradalmasította. A kacsokat azóta teljes mértékben helyettesítették az automata pipetták és pipettázóberendezések (**2.e, 3. ábra**). Az elsőként Takátsy által feltalált üreges mikrolapokat azonban mindmáig használják a világban.

Az 1950-es évek hazai patológiás környezeti publikálási tilalmai meggátolták Takátsyt, hogy eredményeit megfelelően publikálja és szabadalmaztassa, a szabadalmaztatási hátrányából külföldi műszergyártó cégek gazdagodtak meg. Jelentős késéssel ugyan, Takátsy üreges mikrolapok feltalálására vonatkozó prioritása és tudományos érdemei teljes elismerést kaptak, és ma már a klinikai analitikai laboratóriumi titrálás és az analitikai mikrolapok alkalmazása klasszikusának tekintik [10–11]. A mikrolapok kezeléséhez (pipettázás, leolvasás, tisztítás) számos berendezést gyártanak és forgalmaznak ma is világszerte. Példaképpen a **3. ábrán** a BIOTEK cég készüléke látható.

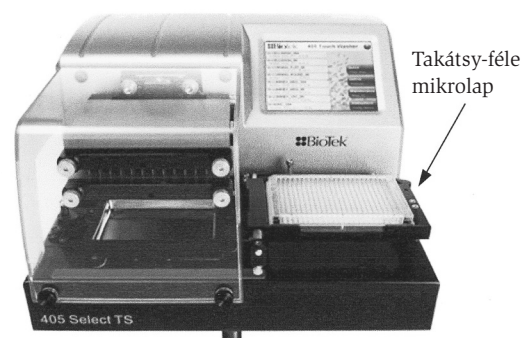
1990-ben világszerte több mint 15 vállalat gyártotta nagy sorozatban a titrálási mikrolapokat, és akkori értékelések szerint csak 2000-ben 125 millió lapot használtak analitikai célokra [7].

A fentebb ismertetetteket nemcsak azért tekintjük figyelemre méltónak, mert a Takátsy-féle titrálási mikrolapok jelentették az analitikai kémiát forradalmasító sorozatméréses miniatürizálás első lépését, hanem azért is, mert fényt vethettek a hazai tuda-

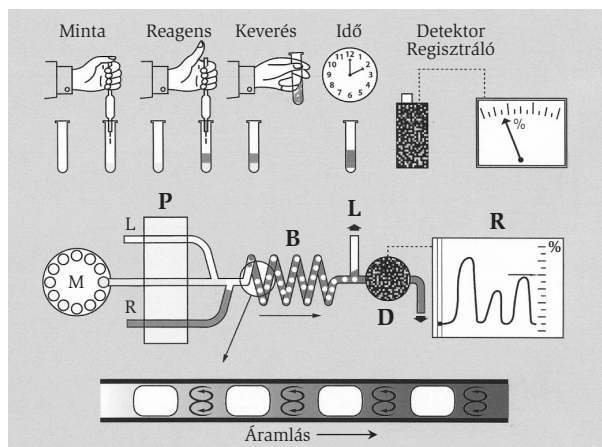


**2. ábra. Mikrotitrálás és titrálási mikrolapok.**

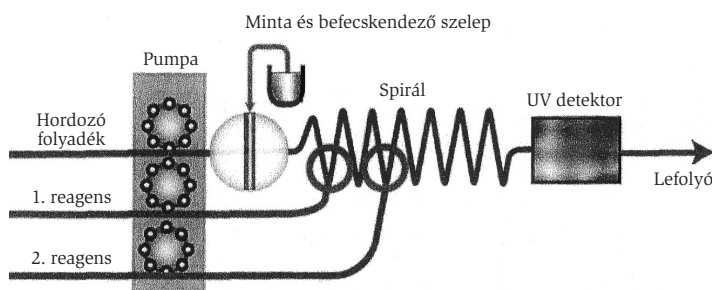
- a) Egyedi kémcsősorozat. b) Takátsy-féle mikrotitrátor és eszközei. c) Takátsy-féle spirálkacsok. d) Sorozathígítási mikrotitrálás kacsokkal és furatos (mélyedésses) mikrotitráló lappal. e) A 90-es években kifejlesztett, a kacsokat később helyettesítő automata mikropipetta. f) Színes titrálási mikrolapok. g) A 90-es években kifejlesztett 384 és 1536 üregű mikrotitráló lapok (mikroliteres folyadéktérfogatokhoz). h) Titrálási mikrolapsorozat



**3. ábra. A Takátsy-féle mikrolapok kezelésére (pipettázás, titrálás, tisztítás) épített automata berendezések egyike**



4. ábra. A Skeggs-féle folyamatos CFA analízátor alaprajza [18] az egyedi mintafeldolgozással szembeítve (fent), L: levegő, R: reagens. Levegőbuborékokkal elválasztott folyadékminták a csőben (lent)



5. ábra. A Ruzicka-Hansen-féle FIA berendezés [18]

mányos eredmények publikálásának és szabadalmaztatásának patológiás viszonyaira a múlt évszázad ötvenes éveiben. A titrálási mikrolemezek gyártásából és forgalmazásából mindmáig világszerte sokan gazdagodtak meg. Az 1914-ben született és 1980-ban elhunyt Takátsy Gyula, sajnos, nem tartozott közéjük.

Végezetül megemlítjük, hogy egy 2010-ben publikált összefoglaló cikkben [13] „Analytical Ancestry: Evolution of the Array in Analysis” (*Analitikai eredet: a sorozatmérés fejlődése az analitikában*) címmel hangsúlyozzák az analitikai sorozatvizsgálati mikroszközök, beleértve az üreges mikrolapok mindmáig tartó jelentőségét.

## Második lépés a miniaturizálás felé vezető úton

### Folyamatos áramlásos analízis (Continuous Flow Analysis, CFA)

Leonard Skeggs egyesült államokbeli vegyész a múlt évszázad ötvenes éveiben egy clevelandi kórház klinikai kémiai laboratóriumában dolgozott, ahol naponta több száz vizelet- és vérmintát elemeztek.

Miután látta a négy technikusa által felhasznált jelentős reagensmennyiséget és azt a hosszú időt, amit a minták egyedi elemzésére fordítottak, felmerült benne, hogy az egyedi, illetve sorozatos elemzésekkel szemben találni kellene valamilyen analitikai eljárást, ami a sok mintasorozat szekvenciális sorozatelemzését folyamatossá tenné. Nem a klinikai laboratóriumban, ahol dolgozott, hanem a háza pincéjében kialakított kis laborhelyiségben kísérletezte ki azt az eljárást, ami folyadékminták rugalmas gumi-, vagy műanyag csövekben perisztaltikus pumpával való folyamatos áramoltatásán alapult, és ami később a Continuous Flow Analysis (CFA) (folyamatos áramlásos analízis) elnevezést kapta<sup>b</sup>. A CFA-ról publikált 1981-es összefoglaló dolgozatában [14] Motolla azt hangsúlyozta, hogy a folyamatos áramlásos analízis gondolatával Skeggs olyasmire jött rá, ami előtte senkinek eszébe nem jutott, és annak alapján egy önműködő analitikai berendezést hozott létre. Ez a berendezés, amint a 4. ábrán látható séma mutatja, mintaadagolóból, perisztaltikus pumpából, különböző vastagságú műanyag csövekből, áramlásmérőből, csőspirálból és analitikai detektorból állt. Az alapvető elképzelés szerint az ábrán sárgával jelzett áramló, úgynevezett vivő, vagy szállító folyadékáramba oldalról beáramoltatott levegőbuborékok szakították a folyadékáramot folyadékdugókká. A folyadékdugókhöz szintén oldalról, áramlással adagolt elemzendő minták és reagensek a spirálcsőben áramló folyadékdugóban keveredtek, majd folyamatos továbbáramoltatással végül a fotometriás detektorba értek. Itt lezajlott a mérés, és a berendezéshez kapcsolt regisztrálóban megjelentek az eredmények.

1957-ben publikált cikkében [15] és azzal egyidejűleg bejelentett szabadalmában Skeggs a folyamatos áramlásos analitika koncepciójának kidolgozásával megnyitotta a sokmintás gyors folyamatos analitikai mérések felé vezető utat.

Érdemes megjegyezni, hogy első látásra a kortársak annyira nem ismerték fel Skeggs ötletének a jelentőségét, hogy az 1957-es cikk közlését a *Journal of Clinical Chemistry* visszautasította, és végül csak jelentős átírás után fogadta el közlésre. Sőt, Skeggs hiába ajánlotta fel szabadalmaztatott találmányát gyártásra világhírű műszergyártó cégeknek (például Beckman, Hewlett-Packard), próbálkozásai eredménytelenek maradtak. A cikk visszautasítása, majd későbbi elfogadása körüli bonyodalmakat Skeggs egy 1978-ban publikált dolgozatban [16] írta le. Végül egy alig 12 személyt foglalkoztató, egyesült államokbeli kis cég, a Technicon ráértett a folyamatos elemzés elvének jelentőségére és a benne rejlő műszerfejlesztési lehetőségekre: 1969-ben megépítette és forgalmazni kezdte az AutoAnalyzer elnevezésű berendezést. A készülék és különböző változatai világsikerré váltak, és milliárd dolláros profitot hoztak a gyártóknak.

## Harmadik lépés a miniatürizálás felé vezető úton Áramlásos befecskendezéses analízis (Flow Injection Analysis)

A FIA fölfedezéséről Stewart 1981-ben publikált dolgozatára [17] és véleményére hivatkozhatunk. „1970-ben Nagy, Fehér és Pungor beszámolt grafitelektrodok alkalmazásáról folyamatosan áramló folyadékmintákba befecskendezett voltametriás méréséről. Ez az általam talált legkorábbi olyan beszámoló, ami ma áramlásos befecskendezéses analízisnek (FIA) lenne nevezhető.” Ezt a FIA kezdeteire vonatkozó állítást hasznosan egészítheti ki Margoshes [18] 1982-ben közzétett álláspontja, miszerint: „Ruzicka és Hansen dániai csoportja említhető elsődlegesen, ha a szegmentálatlan folyamatos áramlásos eljárások gyakorló analitikai kémikusok általi elfogadtatásáról beszélünk, valamint stimuláló volt érdeklődésük a minták áramló folyadékba való befecskendezésének elméleti és gyakorlati vonatkozásai iránt. De nem hagyhatók figyelmen kívül olyan, a szegmentálatlan folyamatos áramlásos rendszerekre vonatkozó úttörő munkák, mint például Pungor és munkatársaié. Ezek a korai hatvanas, illetve hetvenes években elért eredmények elektrokémiai szenzorok teljesítményének értékelésére vonatkoztak szegmentálatlan folyamatos áramlásokban.” A FIA felfedezéséről hasznos szempontokat ismertet jelen szerző egy 1984-ben publikált dolgozata is [19].

A FIA estében a különbség az, hogy míg a CFA-ban a folyadék főáramát levegődugókkal szakítják meg, addig a FIA-nál egy vívőfolyadék-főáramba fecskendezik a folyadékmintákat (5. ábra). Az alapberendezés is csak annyiban különbözik a Skeggs-félettől (4. ábra), hogy a minta befecskendezését befecskendezőcsap (5. ábra) látja el.

A FIA esetében a folyadék-főáramba fecskendezett mintafolyadék áramlásában a detektor irányában két, lényegében kinetikai folyamat egyidejűleg jön létre: a minta fizikai diszperziója és a minta és reagens-főáram közötti kémiai reakció. Ezen folyamatok egyike sem éri el az egyensúlyt, de az áramlás sebességének ellenőrzésével a diszperzió olyan pontosan ellenőrizhető, hogy a minta és sztenderd minták párhuzamos feldolgozásával a detektálás során a minta koncentrációja reprodukálhatóan kiszámítható.

Ruzicka és Hansen a folyadékbecskendezés alapján számos berendezést dolgozott ki és szabadalmaztatott a FIA alkalmazására, és ezeket először a dán Tecator cég, majd világszerte számos más cég is gyártani kezdte. Néhány továbbfejlesztett, és különböző analitikai mérésre alkalmas változatot az 5. ábra mutat be.

A CFA-elv alapján gyártott, sok mintát elemző automatikus berendezések jelentős konkurenciára találtak a FIA alapján gyártottakban, sőt a világméretű vetélkedés a két elv alapján végzett kutatási eredményeket leíró publikációk számának időbeni alakulásában is megmutatkozott, amint a 6. ábra mutatja.

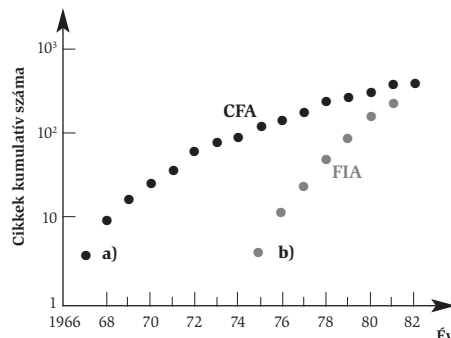
Az ábrán látható, hogy a FIA különböző alkalmazásait leíró cikkek száma 1974-től kezdődően folyamatosan növekedett, és a múlt század nyolcvanas éveinek elejére utolérte a CFA-alkalmazásokat leíró cikkek számát [20].

## Mikrofluidikai miniatürizálás

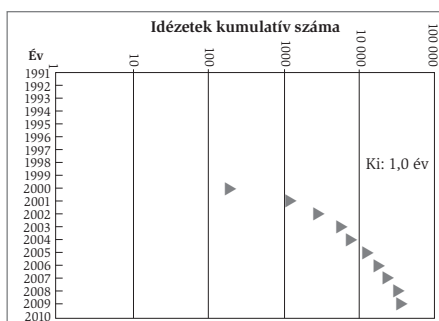
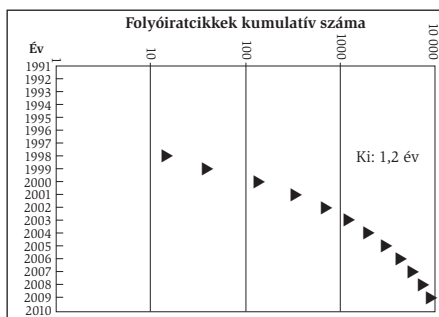
Mindennapi életünkben számos törekvést figyelhetünk meg, amely célja minél kisebb, egyszerűbb, okosabb készülékek, berendezések kialakítása. Talán a legnyilvánvalóbb és legmeggyőzőbb példaként a mobiltelefonokat, számítógépeket, másolóberendezéseket, nyomtatókat és más informatikai készülékeket említhetnénk.

A fentebb vázolt lépésekhez idomulva az analitikai kémiai folyamatok mikrofluidikai miniatürizálása a 21. század elejére az analitikai kutatás egyik jelentős trendjévé vált (7. ábra). Az ábra bemutatja a mikrofluidikával foglalkozó folyóiratcikkek és az azokra vonatkozó idézetek számának növekedését 2000 és 2010 között. A növekedés rakétasebességűnek tekinthető. Ez a trend számos területet foglal magában, például olyanokat, ahol mikrogyártás<sup>c</sup> (microfabricated) szerkezeteket kutatnak egészen az olyanokig, amik ezek specifikus analitikai alkalmazásait tartják szem előtt. A mikrogyártás [21] olyan szilárd lapkák, kártyák (chippek) tisztakörnyezeti (cleanroom) előállítás, amelyekbe fotolitográfiával, közvetlen lézeres litográfiával, nedves maratással, filmpárolgattatással csatornákat vésnek. Ezt a technikát eredetileg a nyomtatott áramkörök előállítására a mikroelektronikai ipar alkalmazta.

A műszeripar gyors és korai reagálása, illetve részvétele előrevetítette egy a miniatürizált analitikai rendszerek gyártására szakosodott új ipari szektor létrejöttét, ezáltal jelentősen erősítette ezt a fejlődési trendet.

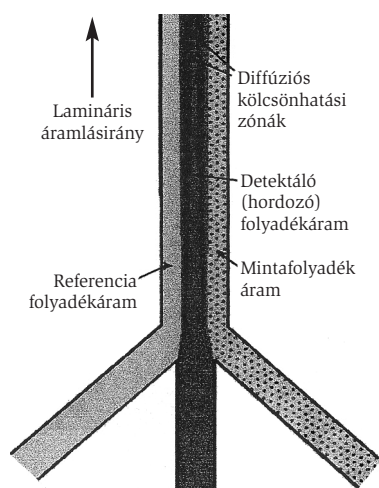


6. ábra. A CFA és a FIA téma kutatásával foglalkozó folyóiratcikkek számának növekedése [20]



7. ábra. A mikrofluidikával foglalkozó folyóiratcikkek és idézeteik számának exponenciális növekedése. Ki: kétszeresödési idő (az az időszak, ami alatt a cikkek és idézetek száma a kétszeresére nő). Adatok a [26] hivatkozásból





**8. ábra.** Diffúzióval detektált analitikai mérés lamináris áramlás során.

A hordozó-, reagens- és mintaáramok párhuzamosan haladnak a mikrocsatornában, látható – kolorimetriásan vagy fluorometriásan mérhető – kölcsönhatási zónákat képezve a hordozóáram két oldalán

A mikrofluidika egyik legjelentősebb jellemzője az, hogy a folyadékok kis átmérőjű csatornában való áramlása során a felület/térfogat hányadosa arányosan nő a méret csökkenésével, és ez számos új analitikai lehetőséget nyújt, amint a továbbiakban látjuk majd.

A mikrofluidika a tudomány és a technológiai rendszerek olyan területe, amelyik kis folyadéktérfogatok<sup>d</sup> ( $10^{-9}$ – $10^{-10}$  liter) áramlásával, feldolgozásával és kezelésével foglalkozik tíztől több száz mikrométer átmérőjű, a fenti eljárásokkal mikrolapkákba vésett, illetve préselt csatornában. Mikrofluidikai berendezésnek nevezhetünk minden olyat, amelyik legalább egy ilyen méretű csatornát használ. A jelentősen csökkentett folyadéktérfogatok, illetve azok mozgatási, áramoltatási tulajdonságai számos rendkívül hasznos lehetőséget kínálnak az analitikai kémiában, például elemzendő minták és reagensnek nagyon kis térfogatainak áramoltatása, illetve az ezzel járó elválasztások és detektálások nagy érzékenységgű és felbontóképességgű megvalósítása; alacsony reagensfelhasználási költségek; gyors mérések és az eszközök csekély helyigénye. Mindehhez a mikrofluidika a rá jellemző két tulajdonságát veszi igénybe: a kis térfogatok áramoltatását és a szűk csatornában létrejövő *lamináris* áramlást. Ezáltal alapvetően új lehetőségeket teremt analitikai mérésekre és ellenőrzésekre.

Valószínűnek tűnik, hogy a mikrofluidika létrejöttét és megvalósítását a legjelentősebb és legjellemzőbb módon – mint említettük – a mikroelektronikának köszönheti. A legelső kutatásokban és mikrofluidikai alkalmazásokban a mikrocsatornák kialakítását szilícium- és üveglapkákra valósították meg. Azonban kiderült, hogy ezeket a lapkákat rendkívül eredményesen helyettesíthetik a műanyag lapkák. A mikrofluidikai kutatásokban és fejlesztésekben szilícium- és üveglapkák helyett, illetve mellett a poli-(dimetilsziloxán)-ból (PDMS) készült lapkákat is bevezették. A PDMS például optikailag átlátszó, lágy elasztomer. Párhuzamosan azonban más polimerek, például polikarbonátok, illetve poliolefinok igénybevétele is folyt és folyik. Az a könnyedség, amivel az új és még újabb elképzeléseket a PDMS-sel ki lehetett próbálni, és öntéssel, vagy préseléssel mikrofluidikához alkalmassá tenni, a PDMS-t a kutatások és technológiai megvalósítások kulcsfontosságú anyagává tették a mikrofluidika fejlődése során. Azonban a mikroelektronikában alkalmazott technológiák a mikrofluidika fejlődésében az üveget, az acélt és a szilíciumot megtartották olyan specializált berendezések esetében, ahol jelentős szerepet játszott a kémiai és termikus stabilitás.

Folyadékok áramlásának két formáját különböztethetjük meg csövekben, illetve csatornában: a lamináris és a turbulens áramlást. A lamináris áramlás esetében a fluidum valamely jellemző helyzetének sebessége állandó környezeti körülmények esetében nem lehet az idő véletlen függvénye.

Folyadékok áramlásának két formáját különböztethetjük meg csövekben, illetve csatornában: a lamináris és a turbulens áramlást. A lamináris áramlás esetében a fluidum valamely jellemző helyzetének sebessége állandó környezeti körülmények esetében nem lehet az idő véletlen függvénye.

Ennek következményeként konvektív anyagátadás csak az áramlás irányában jöhet létre. A Reynolds-szám a folyadék tehetetlenségi és viszkozitási erői hányadosának arányát jelzi, és azt is, hogy egy áramlás lamináris-e. Laminárisnak mondjuk az áramlást, ha a viszkozitási erők uralják a folyadék áramlását a csatornában. Eredetileg a számot *Osborne Reynolds* javasolta 1883-ban áramlások jellegének a leírására [22]. A kis Reynolds-szám lamináris, vagy réteges áramlást jelez, azaz olyat, amiben a folyadékáramok egymással párhuzamosan áramlanak, s csak konvektív és molekuláris diffúzióval keverednek (8. ábra). A nagy Reynolds-szám turbulens áramlásra jellemző, azaz olyanra, aminél különböző folyadék-„csomagok” gyors keveredést idéznek elő a csatornában. A lamináris és turbulens áramlás közötti átmenet jellemzően  $Re_c = 2000$  értéknél történik. A Reynolds-számot ( $Re$ ) a következő képlet írja le:

$$Re = v\zeta l / \eta,$$

ahol  $v$  a folyadék áramlásának átlagos sebessége a csatornában,  $\zeta$  a folyadék fajsúlya és  $l$  a csatorna keresztmetszete [23]. Például víz áramlására egy  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  méretű csatornában  $10\ \text{cm/s}$  sebességgel körülbelül 10-es Reynolds-szám a jellemző. Ez az áramlás így messzemenően lamináris. Viszont egy  $2 \times 2\ \text{mm}$ -es csatornában  $10\ \text{m/s}$  sebességgel áramló víz Reynolds-száma 20 000. Ugyancsak példaként említhető, hogy a diffúziós anyagátadás 100-szor gyorsabb, ha a rendszer 10-szer kisebb, például analitikai elválasztások esetében. Ugyanez érvényes a hőátadásra is.

Ezért a mikrofluidikai lamináris áramlás elősegítésére három különböző erő vehető igénybe: nyomás hatása, az elektrooszmózis, a centrifugális erő alkalmazása.

Nyomással való működtetésre mikrofluidikai lapkáknál általában külső vagy a lapkába beépített pumpákat vesznek igénybe. Elektrooszmotikus nyomás akkor jön létre, amikor egy poláros folyadék érintkezik a szilárd lapkacsatorna felületével és elektromos tér hatása alá kerül. A poláros folyadékkal való érintkezésnél a csatorna fala elektromos töltést vesz fel. Ez elektromos töltésátrendeződést hoz létre a folyadékban, azaz elektromosan ellentétesen töltött vékony ionréteget hoz létre a csatorna falán. Ezt merev rétegnek (stern layer) is nevezik. Ennek külsején vastagabb töltésréteg képződik, amit diffúz rétegnek nevezünk. Ez a réteg a merev réteg polaritásához hasonló töltéseket tartalmaz. A merev réteg ionjai rögzítettek, míg a diffúz rétegbeliek mobilisak. Amikor a csatornára elektromos erő hat, a diffúz réteg töltése folytán mobilissá válik. Például egy kvarclapkában kialakított csatorna felülete a felületi hidroxilcsoportok jelenléte miatt negatív töltésű. Amikor ez a felület kapcsolatba kerül a folyadékkal, az abban lévő pozitív ellenionok a felületre koncentrálnak a negatív töltés ellensúlyozására. Ez diffúz réteget ered-



ményez, amit az elektromos tér mozgásba hoz. A létrejövő egyenes irányú áramlás profiljának sebessége a következő képlet szerinti [24]:

$$v = \frac{\zeta \epsilon_r E}{4\pi\mu},$$

ahol  $v$  a folyadéktömeg sebessége,  $\zeta$  a csatornafal zeta-potenciálja,  $\epsilon_r$  a folyadék dielektromos állandója,  $E$  a rá ható elektromos tér erőssége és  $\mu$  a folyadék viszkozitása.

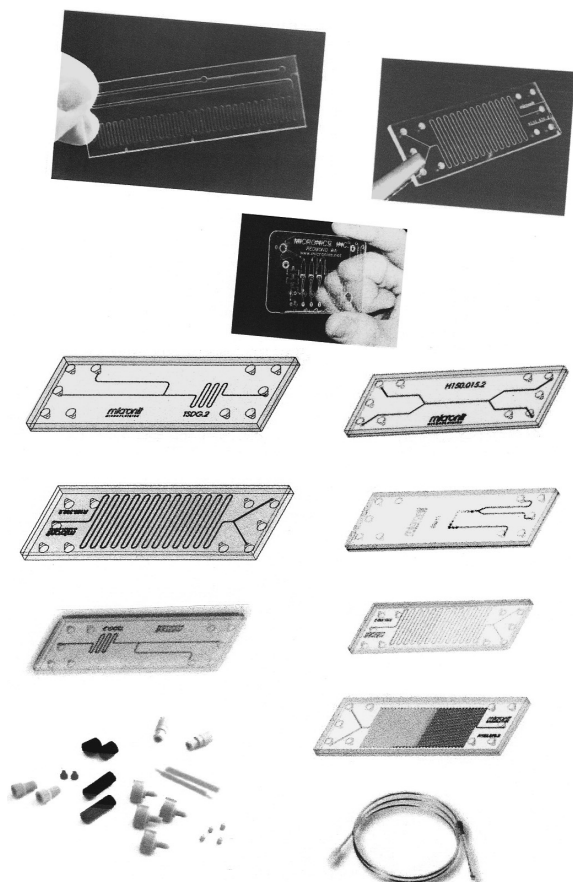
A centrifugális folyadékmozgatás korongszerűen kialakított fluidikai lapkákon történik, erre a célra kialakított pörgetőberendezésekkel. Erre egy későbbi dolgozatban térünk ki. A mikrofluidikai lapkákat különböző formákban gyártják annak érdekében, hogy analitikai mintafeldolgozásra és alkalmazásra megfelelővé váljanak. Néhány ilyen lapkát mutat be a **9. ábra**. Ezekben analitikai mintaoldatok, illetve reagensek áramoltatása, átírányítása, ágaztatása, keverése, elválasztása stb. oldható meg. A megfelelő eszközökkel ezek egymáshoz és külső berendezésekhez, például pumpákhoz, detektorokhoz csatlakoztathatók.

## Integrálás, lab-on-a-chip rendszerek [25]

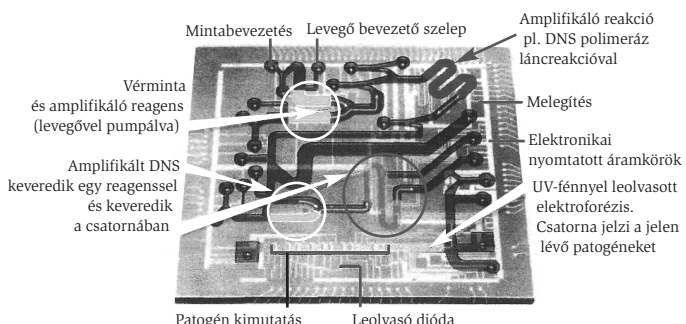
A múlt század ötvenes éveinek végén felfedezték az integrált nyomtatott áramköröket [26]. Az összes elektronikai komponens egyetlen félvezetőre, eleinte germánium-, később szilíciumlapkára integrálták, s tranzisztorokból, ellenállásokból, kondenzátorokból és megfelelő csatlakozóikból álló áramköröket hoztak létre: ezáltal feleslegessé vált az alkatrészek kézi összeszerelése. Az integrált áramkörök építése által ihletve a múlt század kilencvenes éveiben a **9. ábrán** bemutatott mikrofluidikai lapkákból, csatlakozókból, valamint külső pumpából és detektorokból kialakuló integrált mikrofluidikai berendezések kialakítására adódott lehetőség [27]. Ezeket a szakirodalomban a *lab-on-a-chip* névvel jellemezték. Jelen szerző tudomása szerint ennek a kifejezésnek még nem alakult ki magyar nyelvű változata. Mivel a szó szerinti fordítás meglehetősen nehézkes és félreérthető lenne, felmerült a „laborlapka”, vagy a ma már mindennapi használatban lévő, bankkártyákhoz hasonló és méretben is összevethető „laborkártya” elnevezés. A továbbiakban az utóbbit használjuk.

A **9–11. ábra** a fentiek szerint kialakított laborkártya-példákat mutat be. Mint látható, egyetlen, zsebben hordható kártya számos analitikai funkciót integrál, miniatürizált hagyományos analitikai laboratóriumként is működhet és elláthat olyan feladatot,

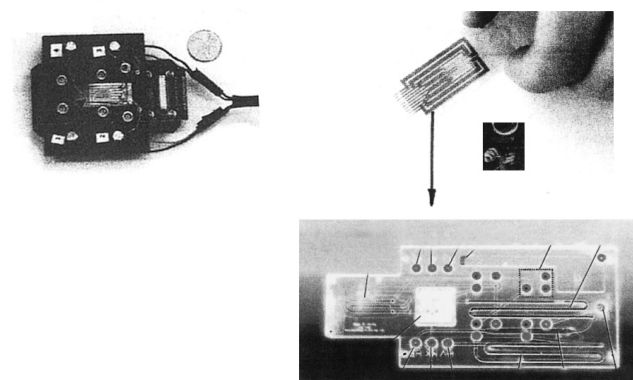
**9. ábra.** Kereskedelmileg forgalmazott analitikai alkalmazású mikrofluidikai lapkák és csatlakozók [31]



**10. ábra.** Influenza kimutatására alkalmas integrált mikrofluidikai laborkártya [28]



**11. ábra.** DNS hibridizálási vizsgálatokra alkalmas laborkártya és berendezés [34]



amikor nem a mintát viszik a laboratóriumba, hanem a laboratóriumot a mintavételi helyre. Ennek például a környezetvédelemben, nehezen megközelíthető és/vagy veszélyes ipari helyeken, beteg melletti, illetve kórházi vizsgálatok során van különleges jelentősége [28].

## Fejlődés és jövőkép

A terület fejlődése a múlt század kilencvenes éveitől kezdődően olyan rohamossá alakult, hogy 2001 óta az egyesült királyság-beli Royal Society for Chemistry kiadásában egy *Lab-on-a-Chip* című folyóirat is megjelenik [29].

A laborkártya-kutatás további, főleg közeljövőbeli fejlődésének előrejelzésére talán érdemes megjegyezni: a szerző valószínűnek tartja, hogy a jelentősen terjedő 3D nyomtatók lehetővé teszik, hogy a kutatók saját szükségleteiknek megfelelően nyomtassanak, illetve sajátkezűleg állítsanak elő, építsenek mikrofluidikai laborkártyákat [30, 31].

Végezetül röviden visszatérhetünk a címben jelzett kiindulási ponthoz, azaz a kémcsőhöz. Ugyanis a kémiai és az orvosi biológiai kutatások egyre intenzívebb szinergetikus átlapolása a miniaturizálás terén is hangsúlyozni kívánja jelenlétét és igényeit. Ilyenek például a „living cells as test tubes” (élő sejtek mint kémcsövek), amelyeket a sejtfaltól elzárt edényekként vizsgálhatnak, és a bennük végbemenő vagy esetleg végbe vihető reakciókat is tanulmányozhatják. És persze a rendkívüli kis folyadéktérfogatok analitikai felhasználási jövőjeként említhetők az olyan fejlesztések, amelyeket az „analytical chemistry on the femtoliter scale” [32] (analitikai kémia a femtoliter tartományban) névvel illethetünk<sup>e</sup>. Ez szorosan összefügg a még csak törekvésként, de már jelen lévő nanofluidikai nanokártyák (nano-chips) elgondolásaival [33].

### JEGYZETEK

<sup>a</sup> Szerológiai titrálás: vérszérumban antigén, illetve antitest sorozatos, gyakran tíz lépésben elvégzett hígítása az olyan, legnagyobb hígítás meghatározására, amely még detektálható antitestet tartalmaz. Ennek a hígításnak a reciprokát a szérumban antitest-titerének nevezik.

<sup>b</sup> Ennek azért volt jelentősége, mert így a későbbi szabadalmi igényt nem a kórház tulajdonaként, hanem magántulajdonként jelenthette be, illetve kaphatta meg.

<sup>c</sup> Tudomásunk szerint az angol „microfabrication” kifejezésnek még nincs magyar fordítása. Jelen szerző még egyik hozzáférhető angol-magyar szótárban (beleértve a műszakiakat is) sem talált rá. Ezért itt a szó szerint fordított „mikrogyártás”-t használjuk.

<sup>d</sup> Bár a mikrofluidikai területe minden fluidumra vonatkozik, jelen dolgozat csak a folyadékok mikrofluidikájával foglalkozik.

<sup>e</sup> Az angol nyelvű szakirodalomban a miniaturizálásra a „down sizing” (leméretezés) kifejezést is használják.

### IRODALOM

- [1] Szabadváry Ferenc, Az analitikai kémia módszereinek kialakulása, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1960.
- [2] F. Szabadváry, History of Analytical Chemistry, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- [3] H. A. Laitinen, G. W. Ewing, A History of Analytical Chemistry, American Chemical Society, Division of Chemistry, 1977.
- [4] G. W. Ewing, Analytical Instrumentation Handbook, Marcel Dekker, Inc., New York, 1990.
- [5] Takátsy Gyula, Kísérletes Orvostudomány (1951) 2, 293.
- [6] <http://medical.dictionary.thefreedictionary.com/titration>
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/microtiter\\_plate](http://en.wikipedia.org/wiki/microtiter_plate)
- [8] Roy Manns, History of Microplates, <http://www.plastiquarian.com/index.php?id=13&subid=179>
- [9] J. L. Sever, J. of Immunology (1961) 88, 320.
- [10] H. Zähringer, Laborjournal, <http://www.laborjournal.de>
- [11] J. Burbaum, Chem. in Britain (1998) June, 38.
- [12] [http://www.laboautopedia.org/mw/index.php/Early\\_microplate\\_automation](http://www.laboautopedia.org/mw/index.php/Early_microplate_automation)
- [13] L. J. Kricka, K. Imai, P. Fortina, Clinical Chemistry (2010) 56, 1797.
- [14] H. A. Mottola, Anal. Chem. (1981) 53, 1312A
- [15] L. T. Skeggs jr., Am. J. Clin. Pathol. (1957) 28, 311.
- [16] L. T. Skeggs, Current Contents (1978) 36, 200.
- [17] K. K. Stewart, Anal. Chem. (1981) 53, 1312A
- [18] J. Ruzicka, Flow Injection Analysis, Tutorial on Flow microanalytical Techniques, Fourth Edition, 2009, Available free of charge from FIA Lab Instruments, Inc., [www.flowinjection.com](http://www.flowinjection.com)
- [19] T. Braun, W. S. Lyon, Fresenius Z. Anal. Chem. (1984) 319, 74.
- [20] T. Braun, E. Bujdosó, A. Schubert, Literature of Analytical Chemistry: A Scientometric Evaluation, CRC Press, Inc., Boca Raton, 1987.
- [21] M. J. Madon, Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization, CRC Press, Boca Raton, 2002.
- [22] O. Reynolds, Philos. Trans Royal Soc. (1883) 174, 935.
- [23] C. T. Crowe, D. F. Elgar, J. A. Anderson, Engineering Fluid Mechanics, Wiley, New York, 2000.
- [24] T. McCreedy, Trends Anal. Chem. (2000) 19, 396.
- [25] P. C. H. Li, Microfluidic Lab-on-a-Chip for Chemical and Biological Analysis and Discovery, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
- [26] T. R. Reid, The Chip: Two Americans Invented the Microchip and Launched a Revolution, Simon & Schuster, New York, 1984.
- [27] <http://www.thinkxxs.com/main/producte/microfluidixxs/html>
- [28] Ch. Q. Choi, Scientific American (2007) October, 74.
- [29] Lab-on-a-Chip, Miniaturization for Chemistry, Physics, Biology and Bioengineering, Royal Society of Chemistry, UK, 2001.
- [30] N. Jones, Nature (2012), 487, 22.
- [31] M. D. Symes, Ph. J. Kitson, Jun Ian, C. J. Richmond, G. J. T. Cooper, R. W. Bowman, T. Vilbrandt, L. Cronin, Nature, Chemistry (2012) 4, 349.
- [32] H. H. Gorris, D. R. Walt, Angew. Chem. Int. Ed. (2010) 49, 3880.
- [33] K. E. Drexler, Nanotechnology (1991) 2, 113.
- [34] D. Ericson, D. Li, U. J. Krull, Anal. Biochem. (2012) 4, 346.
- [35] A. Manz, N. Graber, H. M. Widmer, Sensors, Actuators (1990) B1, 244.

# A nukleáris kémikus, aki előre látta a múltat

## Paul Kazuo Kuroda és az oklói ősreaktorok

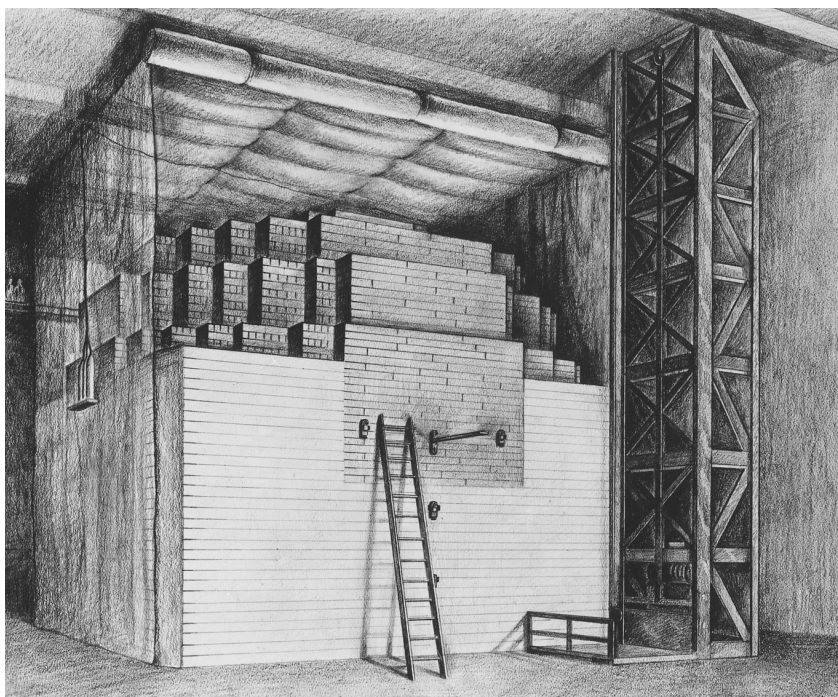
Az értelmező szótár szerint a címben használt előrelátás valaminek a kikövetkeztetését, megérzését, a várható következményekkel való számolást jelenti. [1] Talán nem felesleges ezt Niels Bohr, a neves Nobel-díjas dán fizikus szellemes mondásával kiegészíteni, amely szerint „előre látni rendkívül nehéz, főleg a jövőt”. [2] Amennyiben Bohr mondása igaz, a múltat előre látni, mint ahogyan a cím állítja, feltételezhetően még nehezebb, vagy egyszerűen pleonazmusnak tekinthető. Bármennyire meglepőnek tűnik, a továbbiakban bizonyítani kívánjuk, hogy a tudományban előfordulhat olyan eset, amikor egy újnak tűnő esemény már megtörtént a nagyon távoli múltban, és ennek igazát egy előre látott, még meg nem történt újabb felfedezés meggyőzően igazolja.

### Bevezetés

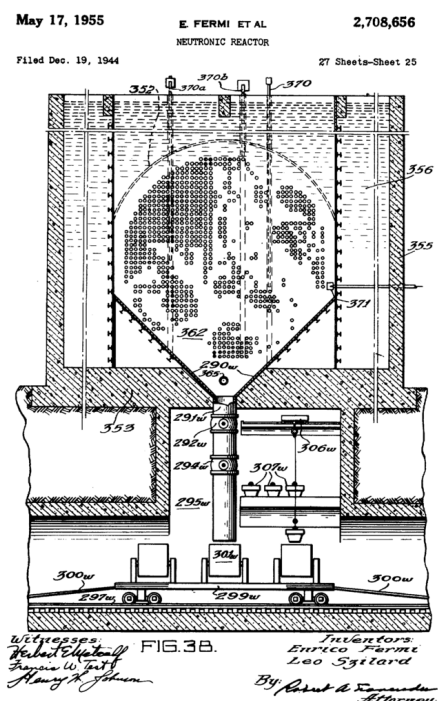
A történet az atommaghasadás [3] és a nukleáris láncreakció [4] felfedezésével kezdődött, és a II. világháború idején, az atom-bomba-építés szupertitikos Manhattan-tervének keretében, a Pile-1 (CP-1) [5,6] elnevezésű atommáglya felépítésével kulminált. A később (1952-től kezdődően) nukleáris reaktornak (atomreaktornak) [7] elnevezett berendezésben (1. ábra) az önfenntartó és ellenőrzött nukleáris láncreakciót 1942. december 2-án mutatta be Fermi.

Fermi és Szilárd a berendezésre 1944-ben „Neutronic Reactor” néven szabadalmi bejelentést nyújtott be az Egyesült Államok szabadalmi hivatalához, de az a háború és titkosítás okán csak 1955. május 17-én, 2 708 656 szabadalmi lajstromszámon vált nyilvánossá (2. ábra). [6] A nukleáris reaktorok további fejlődésének, mondhatnánk sorsának alakulása a fent említettől kezdődően a tudományos kutatóreaktorokon, az atomerőműveken, Csernobilon és végül Fukusimán át ma már közismert. A témának könyvtári irodalma van, aminek akár dióhéjban való ismertetése majdnem lehetetlen, de e dolgozatnak sem célja, sem feladata.

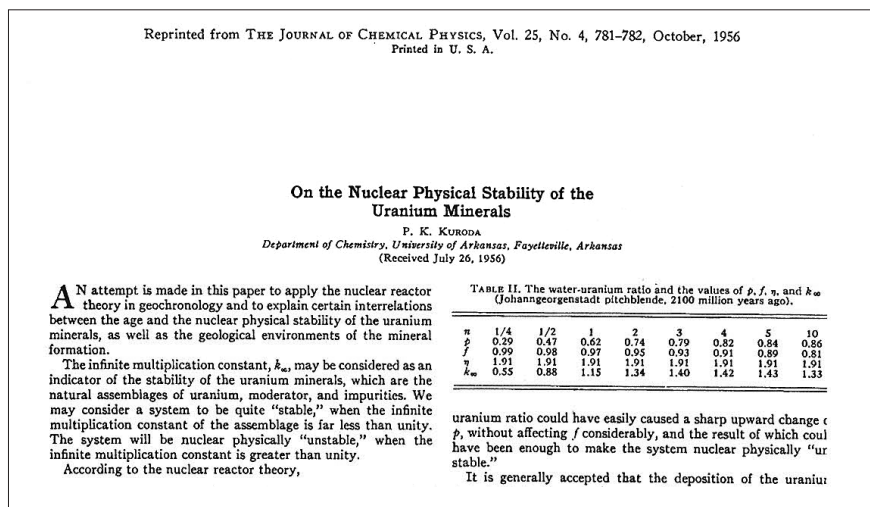
1. ábra. A chicagói squash-pálya alatt megépített atommáglya (CP-1) rajza



2. ábra. Részlet az Enrico Fermi és Szilárd Leó által 1944-ben benyújtott „Neutronic Reactor” szabadalmi leírásából







3. ábra. A feltételezést ismertető egyoldalas cikk részlete



4. ábra. Paul Kazuo Kuroda nukleáris kémikus (1917–2001)

## A feltételezés

Tizennégy évvel a Fermi és Szilárd által 1942-ben feltalált és működés közben bemutatott atomreaktor után az Egyesült Államokban kiadott *Journal of Chemical Physics* című folyóiratban egy szerény terjedelmű, egyoldalas cikk jelent meg „On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals” címmel (3. ábra). [8] A cikk ez igénytelen cím alatt elméleti alapon nem kevesebbet állít, mint azt, hogy uránércbányákban a megfelelő, főleg geológiai, méretbeli és környezeti körülmények kedvező alakulása esetén körülbelül két milliárd évvel ezelőtt „the critical uranium chain reaction could have taken place”, azaz egy természet alkotta, urán láncreakció alapján működő reaktor létrejötté feltételezhető lenne.

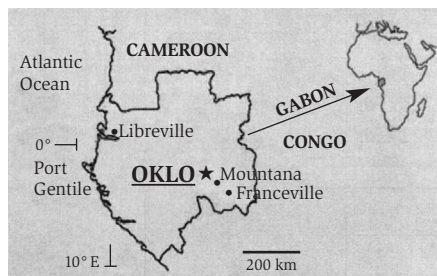
A cikk szerzője Paul Kazuo Kuroda (4. ábra) japán származású nukleáris kémikus, akkor az University of Arkansas (Fayetteville) professzora volt. A cikk, forradalmi feltételezése ellenére, teljesen észrevétlen maradt, és az enyészet sorsára jutott volna, ha 1972-ben nem következik be egy olyan esemény, amely Kuroda cikkét robbanásszerűen a tudományos világ fókuszpontjába hozza.

## A francia atomprogram és a de Gaulle-féle „Force de Frappe”

A francia atomenergia-bizottságot (Commissariat de l'Energie Atomique, CEA) de Gaulle tábornok rögtön a második világháború befejezése után hozta létre. Ezáltal Franciaország lett az első olyan ország a világon, amely civil atomenergia-bizottságot létesített. Ennek keretében indult meg Franciaországban az intenzív nukleáris kutatás, épültek meg kutatási atomreaktorok és atomerőművek. [9]

Annak ellenére, hogy de Gaulle tábornok a háború után erőteljesen szorgalmazta Franciaország nukleáris fegyverekkel való felszerelését, a békeépítési tilalmak következtében erre csak 1954-ben kerülhetett sor, a „Force de Frappe” (ütőerő) program keretében. [10] Annak ellenére, hogy Közép-Franciaországban, Limoges környékén már 1950 körül jelentős uránérc-lelőhelyeket fedeztek fel, és az ércek feldolgozására felépült például a pierrelatte-i dúsítóüzem is, a katonai nukleáris program beindulásával a hazai igények fedezésére az uránérc-tartalékok már elégtelennek bizonyultak. Ennek jegyében merült fel a külföldi uránérc behozatalának igénye.

## Gabon és az oklói uránércbányászat



5. ábra. A közép-afrikai Gabon Köztársaság és az oklói bányavidék

Gabon az afrikai országok méretéhez képest kis köztársaság Közép-Afrikában; régebben francia gyarmat volt, ma önálló (5. ábra). Északon Egyenlítői Guinea és Kamerun, keleten és délen a Kongói Köztársaság, nyugaton pedig az Atlanti-óceán határolja.

1910-ben Gabon Francia Egyenlítői Afrika négy területének egyike lett. Ez így maradt 1959-ig; 1960-ban függetlenné vált a terület. Gabon még francia gyarmat volt, amikor a francia Commissariat de l'Energie Atomique később COGEMA, majd Areva NC néven ismertté vált ipari részlegének geológusai 1956-ban uránlelőhelyeket fedeztek fel ezen az Európától távoli helyen. Franciaország rögtön a COMUF (Compagnie des Mines d'Uranium de Franceville) által működtetett uránbányákat és uránérc-előfeldolgozó üzemet nyitott Mountana falu mellett a jelentős uránérc-

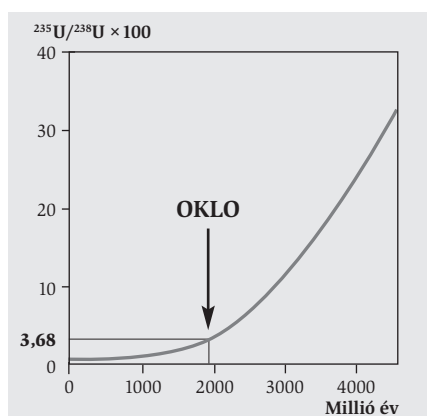




6. ábra. Az oklói nyíltszíni uránércbánya

Évvel ezelőtt	$\frac{^{235}\text{U}}{^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}}$
0	0,72%
$0,5 \times 10^9$	1,08%
$1 \times 10^9$	1,63%
$1,5 \times 10^9$	2,44%
$2 \times 10^9$	3,65%
$2,5 \times 10^9$	5,42%
$3 \times 10^9$	7,87%

1. táblázat. Az Urán-235 koncentráció időbeli változása



7. ábra. A földkéreg urán-235/urán-238 arányváltozása az idők folyamán. Az ábrán jelzett időpontban Oklóban az urán-235 koncentrációja körülbelül 3,68% volt [11]

tartalékok kitermelésére. Gabon állam a kisebbségi részesedést kapta a társaságból. Oklo egy Franceville városka melletti terület Gabon Haut-Ogoone tartományában, körülbelül 400 kilométernyire az Atlanti-óceán partvidékétől. E helyen alakították ki a legtermelékenyebb uránbányákat (6. ábra). Az ország tengerparti kikötőjéből heti rendszerességgel szállították Franciaországba feldolgozásra az uránércet, miután a Mountana melletti előkészítő üzemben megőrölték.

## Az oklói uránérc összetétele

Mint közismert, az uránnak két fő izotópja van, a hasadó  $^{235}\text{U}$  és a  $^{238}\text{U}$ . Az előbbi gyorsabban bomlik, mint a második, azaz felezési ideje 0,71 milliárd év a 4,51 milliárd évvel szemben. Ennek eredményeként a hasadó nuklidok gyakorisága időben csökken, azaz a távoli múltban az  $^{235}\text{U}$  koncentrációja sokkal nagyobb volt, mint jelenleg (7. ábra és 1. táblázat).

Más szavakkal, bár mindkét uránizotóp radioaktív, olyan hosszú a felezési idejük, hogy az a teljes uránmennyiség, ami a földgolyó képződésékor, 4,51 milliárd évvel ezelőtt jelen volt, ma is létezik. Viszont minden 100 000 uránatom mellett jelenleg csak 750 urán-235 atom van.

Ezzel szemben az oklói uránércben, illetve mindenütt a Földön (és a Naprendszerben) 2 milliárd évvel ezelőtt az urán-235 relatív koncentrációja 3000 atom volt 100 000 uránatomra vonatkoztatva. Az oklói rendszeres franciaországi uránércszállítások során a pierrelatte-i feldolgozó-, illetve dúsítóüzemben az ércből és a dúsított  $\text{UF}_6$ -ból tömegspektrometriásan rutinszerű urán-235 meghatározást végeztek. Ezen analitikai mérés várt eredményének minden szállítmány esetében  $0,7202 \pm 0,0006\%$ -nak kellett lennie.

## Az urán analitikai kémia apoteózisa

Az említett rutin uránércvizsgálat során 1972 júniusában a szolgálatban lévő analitikus a szokatlan  $0,7171 \pm 0,0007\%$  urán-235 értéket mérte annak ellenére, hogy az urán-235 koncentrációnak akkor a fentebb említettnek kellett lennie mindenütt a Földön, sőt, a Holdon is. Megjegyzendő, hogy az eltérés jelentéktelennek is mondható lett volna, ha az ügyeletes analitikus annak tekintette volna. Amennyiben ő nem lett volna annyira skrupulózus, mint amilyen volt, a világ, mint a továbbiakban kiderül, egy

## A nukleáris kémikus, aki előre látta a múltat

rendkívül fontos felfedezéssel lett volna szegényebb. Sokszor megismételt mérések ugyanis kimutatták, hogy a szokatlan eredmény nem mérési, vagy minta-előkészítési triviális hibából eredt. A francia szakemberek a hatóságok támogatásával több száz mintán ismételték meg a mérést, sőt, az urán-235 izotóp koncentrációját az érc feldolgozása során nyert  $UF_6$ -ban is ellenőrizték. Kiderült, hogy az eltérés semmiképp sem eredhetett mérési hibából, vagy külső szennyeződésből: az eredmények anomális összetételű természetes ásványt jellemeztek. A vizsgálatok kimutatták, hogy a mountanai üzemből 1970 decembere és 1972 májusa között érkező ércminták átlagos uránizotóp-aránya a szokásosnál kisebb volt. Kiszámították, hogy az anomália több mint 700 tonna feldolgozott uránt érintett. Az összes szállítmány urán-235 izotóphiánya körülbelül 200 kilogrammot jelentett. Ez nem akármilyen méretű jelenségtől származhat. Párhuzamos mérések azt is kimutatták, hogy a bánya egy évekkel azelőtti furatából származó mintákban a hihetetlenül alacsony, 0,440%-os izotóparányt is jelezték. 1972 augusztusában különböző hipotézisekkel igyekeztek magyarázni a jelentős izotóparány-eltéréseket, de az egyetlen elfogadható magyarázatnak az látszott, hogy az urán-ércben ősi nukleáris láncreakció játszódott le.

Erre utaltak például az ércben kimutatott urán hasadási termékek is, miután a radioaktív felezési sorok végén jelentkező izotóp-összetételek általában nagyon különböztek a természetes elemekétől. A feltételezett urán-235 hasadások százezres nagyságrendűeknek bizonyultak a  $2 \times 10^9$  éves időtartam során. Ilyen mértékű hasadási gyakoriságot csak hosszú ideig fenntartott láncreakciók okozhattak. Ezen túlmenően az uránlerakatok geológiai jellemzői azt is mutatták, hogy egy urán-235 izotópbeli „kritikus tömeg” konfiguráció kialakulása is lehetséges volt, amit az akkor jelen lévő 3%-os uránizotóp-arány (a mai 0,7%-kal szemben) nagyon valószínűvé tett. A francia hatóságok 1972 és 1975 közötti kutatásai arra a következtetésre jutottak, hogy az oklói uránlelőhelyekben körülbelül kétmilliárd évvel ezelőtt az említett urán-235 koncentráció és a természeti jelenségek kedvező közreműködése során természetes fosszilis nukleáris ősreaktorok alakultak ki és működtek. [12–15] Ezek létezésének a bizonyítása világszenzáció volt, és jelentős tudományos ismeretgyarapodásnak tekinthető. A jelenség részletes és alapos vizsgálata a világon számos helyen megkezdődött, a francia kutatások nyomán a téma részletezése több száz publikáció tárgyát képezte és a kutatás a mai napokban is folyik. [16] A részletekre itt nem kívánunk kitérni, de egy érdekes összefoglalót azért megemlítenénk. [17] Természetesen érdekességként a témáról magyar nyelven is megjelentek tudósítások. [18–19]

Ezután érdemes röviden visszakanyarodni ahhoz az analitikus kémikushoz, akinek alapossága nélkül az oklói fosszilis nukleáris ősreaktorok felfedezésére nem került volna sor, vagy talán jóval később történt volna meg. A téma hálátlan szakirodalma e személyt teljesen említés nélkül hagyta, korszakalkotó alaposságát még a franciák sem hangsúlyozták eléggé. Utólagos elismerésként álljon itt ennek a kémikusnak a neve: *H. Bouziges* (a keresztnévét lehetetlen volt kinyomozni). Neve egyetlen publikációban szerepel, abban sem első helyen. [12]

Végül meg kell említeni, hogy a geológiai földtörténet körülbelül négyezer millió éve során a föld különböző pontjain számos helyen alakultak ki uránlerakódások, illetve uránérc-dúsulások és ezeken jelenleg is jelentős mértékű uránbányászat, illetve -kitermelés folyik. Eddig azonban a gaboni oklón kívül sehol nem fedezték fel annak nyomait, hogy összejöttek volna azok a természeti körülmények, amelyek lehetővé tették volna egy urán-235 láncreakció által működtetett nukleáris reaktor létrejöttét.

## Paul Kazuo Kuroda és a visszamenőleges előrelátás

A francia kutatók által 1972-ben felfedezett és 1975-ben mérésekkel és vizsgálatokkal igazolt oklói fosszilis ősreaktor létének nyilvánossá tétele, mint említettük, tudományos világszenzációvá vált és a tudományos közvélemény figyelmébe repítette Paul Kazuo Kuroda 1956-ban publikált és azóta teljesen elfelejtett közleményét. [8] Minden cikk, amely azóta mindmáig újabb és újabb részleteredményeket és igazolásokat közölt az Oklo-jelenség még jobb megismeréséhez és megértéséhez, csaknem kivétel nélkül idézi Kuroda 1956-os cikkét. Ezért is érdemes itt röviden visszatérni azokhoz a természeti körülményekhez, amelyeket Kuroda szükségesnek vélt ahhoz, hogy valahol sok ezermillió évvel ezelőtt lehetővé válhasson egy urán-235 láncreakció alapján működő nukleáris reaktor megjelenése.

Kuroda első előfeltétele szerint az uránérclelőhely mérete meg kellett haladja azt a távolságot, amit a maghasadást indukáló neutronok megtehetnek. Ez a távolság körülbelül háromnegyed méternyi. Ez a feltétel ugyanis biztosítja, hogy egy hasadó urán-235 magból kibocsátott neutron elnyelhet egy másik, a közelében lévő uránmag, mielőtt az kikerül az uránércből.

Kuroda második előfeltétele az urán-235 megfelelő koncentrációja volt. Manapság a legmasszívabb és legnagyobb koncentrációjú uránbánya vagy -lerakat sem válthat nukleáris reaktorrá, mert az urán-235 koncentrációja a jelenlegi 0,72% okán ehhez egyszerűen nem elegendő. Mint említettük, kétezermillió évvel ezelőtt az urán-235 koncentrációja körülbelül 3% volt.

A harmadik előfeltétel neutron-„moderátor” jelenléte volt, azaz egy olyan anyagé, amely lassíthatja azokat a gyors neutronokat, amelyeket a hasadó urán-235 kibocsát, hogy ezáltal alkalmasabbá váljanak más uránmagok eltalálására, illetve hasítására. Ilyen moderátor lehet például a víz.

Végül az uránlelőhely közelében nem lehet jelen jelentős mennyiségű bór, lítium, vanádium, vagy más olyan „méreg”, ami befogja a hasadás által termelt neutronokat és ezáltal elfojthatja a hasadási láncreakciót.

Később bizonyították, hogy ezek a feltételek Oklón és környékén nem is csak egy, hanem 17 helyen teljesülhettek kétezermillió évvel ezelőtt, így ott különböző ideig 17 természetes reaktor működött. Az itt idézett összefoglaló tanulmány [17] részletezi azokat a geológiai, ásványtani, izotópkémiai, neutronfizikai vizsgálatokat, amelyek hozzájárultak az Oklo-jelenség pontos magyarázatához, illetve Kuroda eredeti, vázlatos előrelátásához.

## A nukleáris kémikus, aki előre látta a múltat

A jelen szerző által létesített és szerkesztett nemzetközi folyóirat, a *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 1990-ben felkérte Kurodát, hogy a legilletékesebbként ismertesse előrelátásának a körülményeit, illetve az Oklo-jelenséget. Ezt Kuroda meg is tette egy „The Pre-Fermi Natural Reactor” című cikkben. [20] Ekkortól Kuroda rendszeres és hűséges szerzőjévé vált a folyóiratnak, és különböző nukleáris kémiai témákban 30 eredeti cikket publikált 1991 és 2000 között. Ezeket egy 2001-ben megjelent cikkben foglalta össze. [21]

Amikor a folyóirat az ezredforduló kapcsán és *Glenn T. Seaborg* Nobel-díjas nukleáris kémikus emlékére ünnepi számot publikált 2000-ben, Kuroda felkérésre akkori érdeklődésének és kutatásainak megfelelően „Application of Nuclear Chemistry in the Study of the Universe” címmel [22] küldött be cikket.

Talán érdemes arról is említést tenni, hogy a tudományos közvélemény és a kollégák eleinte milyen kegyetlenül hálátlan módon bántak a forradalmian látnoki gondolatokat és eredményeket nyilvánító és publikáló Kurodával. Egy Oak Ridge-i konferencián jelen szerzőnek említette Kuroda, hogy többször hallotta a róla elhangzott mondatot: „if this idiot is an indication of the program at the University of Arkansas, there must be nothing there at all”. Kurodának ezt a kijelentését mások is hallották tőle és le is írták egyik nekrológiájában. [23]

Az Oklo-jelenség felfedezése után Kurodát az egész világon elismerték és nagyra tartották. Egyedül, illetve társszerzőkkel élete során több mint 400 közleményt publikált.

## Utószó

A világ, helyesen, úgy tudja és messzemenően elismeri, hogy tudományos elveken alapuló műszaki fejlesztésként a nukleáris reaktort Enrico Fermi és Szilárd Leó találta fel 1942-ben. Jelen írás szerzőjének tudomása szerint sem Fermi, sem Szilárd találmányukért anyagi juttatást, illetve javadalmazást soha nem kértek és nem is kaptak.

Mint 1972-ben kiderült, a nukleáris reaktort a természet (angolul jobban hangzik: mother nature) már körülbelül kétmilliárd évvel ezelőtt megalkotta. Úgy tűnik, hogy az emberiség tudományos és műszaki fejlődése során ez az egyetlen ismert példa arra, hogy a természet önmaga képes volt előállítani kedvező természeti körülmények összejárásának révén egy olyan műszaki berendezést, amit az ember gondolkodásának eredményeként, nem a természetet utánóztatva, hanem attól függetlenül alkotott meg. Ennek fordítottjára, azaz arra, amikor az ember a természetet utánóztatva műszaki alkotásokat hoz létre, számos példa ismert.

## IRODALOM

- [1] Juhász József, Szőke István, O. Nagy Gábor, Kovalszky Miklós, Nagy értelmező szótár, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1972.
- [2] [http://braintquote.com/quotes/authors/n/niels\\_bohr.html](http://braintquote.com/quotes/authors/n/niels_bohr.html), lekérve: 2012. 10. 09.
- [3] <http://wikipedia.org/wiki/Maghasad%C3%A1s>, lekérve: 2012. 09. 05.
- [4] <http://wikipedia.org/wiki/Nukle%C3%9C%C3%A1n-creaci%C3%B3>, lekérve: 2012. 09. 05.
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Chicago\\_Pile-1](http://en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile-1)
- [6] <http://oklo.curtin.edu.au/who.cfm>, lekérve: 2012. 08. 23.
- [7] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Atomreaktor>
- [8] P. K. Kuroda, J. Chem. Phys. (1956) 25, 781.
- [9] <http://nuclearweponarchive.org/France/FranceOrigin.html>, lekérve: 2012.10.08.
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Force\\_de\\_Frappe](http://en.wikipedia.org/wiki/Force_de_Frappe), lekérve: 2012, 10.08.
- [11] F. Gauthier-Lafaye, F. Weber, Precamb. Res. (2003) 120, 81.
- [12] R. Bodu, H. Bouziges, N. Morin, J. P. Pfielman, C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. D (1972) 275, 1731.
- [13] N. Neuilly, J. Bussac, C. Freyjacques, G. Nief, G. Vend-ryes, J. Yvon, C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. D (1972) 275, 1847.
- [14] G. Badin, C. Blain, r. Hagemann, M. Kremer, M. Lucas, L. Merlivat, R. Molina, G. Nief, F. Prost-Marechal, F. Regnand, E. Roth, C. R. Acad. Sci. Paris. Ser. D. (1972) 275, 2291.
- [15] R. Naudet, La Recherche (1975) 6, 508.
- [16] M. E. Wieser, S. Barry, J. R. De Laeter, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2012) 293, 949.
- [17] A. P. Meshnik, Scientific American (2005) november, 57.
- [18] [http://www.erdekessegek.hu/index13\\_12.htm](http://www.erdekessegek.hu/index13_12.htm)
- [19] [https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:amummAqpdAAJ:atomeromu.hu/download/177/Hasad%-25C3%25A1si%2520reaktorok%2520a%2520F%25C3%25B6ld%2520felsz%25C3%25ADn%25C3%25A9n.pdf+Hasad%C3%A1si+reaktorok+a+F%C3%B6ld+felsz%C3%ADn%C3%A9n&hl=en&gl=hu&pid=bl&srcid=ADGEESiHoqZtk1pXRH7loNVsAaw\\_pf7xJnMU9FQ-skrA3M-4qWGVwi4qjoaifOgAGSYg3U-dHDxKAa95FK-8GvXhFXL-vVjfq1Aaig7ykB2YQZI56MZE4Bd3-Wtn1GLr1rwIX2lBJSJtRq&sig=AHIEtbS\\_g4N7IkzmzUC0pB1Wik\\_PLUYf8A](https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:amummAqpdAAJ:atomeromu.hu/download/177/Hasad%-25C3%25A1si%2520reaktorok%2520a%2520F%25C3%25B6ld%2520felsz%25C3%25ADn%25C3%25A9n.pdf+Hasad%C3%A1si+reaktorok+a+F%C3%B6ld+felsz%C3%ADn%C3%A9n&hl=en&gl=hu&pid=bl&srcid=ADGEESiHoqZtk1pXRH7loNVsAaw_pf7xJnMU9FQ-skrA3M-4qWGVwi4qjoaifOgAGSYg3U-dHDxKAa95FK-8GvXhFXL-vVjfq1Aaig7ykB2YQZI56MZE4Bd3-Wtn1GLr1rwIX2lBJSJtRq&sig=AHIEtbS_g4N7IkzmzUC0pB1Wik_PLUYf8A)
- [20] P. K. Kuroda, J. Radioanal. Nucl. Chem. (1990) 142, 101.
- [21] P. K. Kuroda, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2001) 247, 249.
- [22] P. K. Kuroda, J. Radioanal. Nucl. Chem. (2000) 243, 141.
- [23] A. M. Robertson, Paul Kazuo Kuroda (1917–2001), <http://www.encyclopediaofarkansas.net/encyclopedia/entry-detail.aspxID=6619>, lekérve: 2012. 09.19.

# Félúton a magas hőmérsékletű szupravezetők kutatásában

## Vetélkedés, versenyfutás és siker

### Előszó

A szupravezetésről és szupravezetőkéről felfedezésük (1911) óta több százezer folyóiratcikket és számos könyvet publikáltak. A szupravezetés és rokon területek kutatásában elért eredményeikért eddig tizennégy kutatónak ítéltek oda a fizikai Nobel-díjat [Abrikosov (2003), Anderson (1977), Bardeen (1972), Bednorz (1987), Cooper (1987), Englert (2013), Ginzburg (2003), Higgs (2010), Josephson (1973), Kamerlingh-Onnes (1913), Laughlin (1998), Müller (1987), Nambu (2008), Schrieffer (1972)]. Az eddigi ismereteket csaknem reménytelen összefoglalni egy ennyire átfogó területen. Ezért kívánjuk itt pontosítani, hogy a teljes kérdéskör alapsimertetésére csak dióhéjban térünk ki, de négy aspektust kiemeltünk, és a továbbiakban azokat szeretnénk körbejárni. Lévé, hogy nem tudtuk a szakirodalomból megnyugtatóan kiolvasni, hogy a szupravezetők kutatása az eredmények alapján a klasszikusan definiált fizikához, kémiához vagy anyagtudományhoz sorolható-e, jobb híján a terület átlapoltsága, illetve interdiszciplinaritása javára döntöttünk, és azt is elhatároztuk, hogy elsőként a magas hőmérsékletű szupravezetők kémiájára, illetve anyagtudományi jellegére összpontosítjuk figyelmünket. A fent említettek közben a tudományos alapkutatás általános működési mechanizmusának egy kérdésére is ki szeretnénk térni, mégpedig a kutatók versengésére és prioritására, de azzal kifejezetten a szupravezetőkre kivetítve kívánunk foglalkozni. Szintén szigorúan a szupravezetőkre vonatkoztatva, körüljárjuk az 1987. évi fizikai Nobel-díj bizonyos aspektusait is. Mindezek folytatásaként, illetve kiegészítésére röviden áttérünk a szupravezetők fizikai működési mechanizmusának elméleti kérdésére, illetve annak taglására, hogy mit, illetve mit nem sikerült eddig elérni ez utóbbi területen.

### Bevezetés

A szupravezetésnek elnevezett jelenséget *Kamerlingh-Onnes* holland fizikus fedezte fel 1911-ben, amiért 1913-ban Nobel-díjjal tüntették ki. Ő azt találta, hogy a higany elektromos ellenállása nullára csökken, amikor azt egy bizonyos jellemző hőmérsékletre ( $T_c$ ), azaz négy Kelvin-fokra ( $-269^\circ\text{C}$  vagy  $-452^\circ\text{F}$ ) hűti le. Mindezt úgy tudta megvalósítani, hogy a Hampson-Linde-ciklus alapján felfedezte a hidrogén cseppfolyósítását [1].

A szupravezetők olyan anyagok, amelyeknek alacsony hőmérsékleteken eltűnik az elektromos ellenállásuk, vagyis az áram veszteség nélkül halad át rajtuk. Más szóval, egy zárt áramkörben, így a szupravezetőkben évszázadokig is keringhet elektromos áram, mindenféle külső behatás nélkül. A szupravezetés létrejött az erre alkalmas kristályos anyag (vegyület) egymással összekapcsolt (csatolt) elektronpárjainak köszönhető. Kellően alacsony hőmérsékleteken, csatolt állapotban az elektronok nem ütköznek rácsatomokba, így akadálytalanul haladnak át az anyagon. A szupravezető állapot rendkívül hasznos, különösképpen az elektromágneseknél, mert a betáplált energia a mágneses tér fenntartására fordítódik, nincs elektromos és hővesztés.

Főleg szokatlan és meglepő jellegénél fogva tartottuk érdemesnek itt megemlíteni egy szupravezetéssel foglalkozó könyv néhány mondatát: „What is even more interesting is that Nature had no intention at all to create the superconducting state. Superconductivity is rather Nature’s oversight – it is an instability, an anomaly. What does the superconducting state literally mean? In the superconducting state, *there is no friction* (kiemelés jelen szerzőtől). In the real world, what does it mean? If friction were absent, Earth would be ideally round, no buildings, no clothes, and I am afraid that the living matter, including us, would not exist at all. Definitely, it was not Nature’s intention. Humans however, after the discovery of the superconducting state, try to derive a good deal of benefit from use of its peculiar properties” [2]. (Különlegesen érdekes, hogy a természetnek egyáltalán nem volt szándéka létrehozni a szupravezetés állapotát. A szupravezetés inkább a természet tévedése: instabilitás, anomália. A szupravezetés állapotában nincs súrlódás. Mit jelent ez a való világban? Ha a súrlódás nem létezne, a Föld ideális gömb formájú lenne, nem lennének épületek, öltözékek – az élet velünk együtt egyáltalán nem létezne. Ezzel szemben az emberiség a szupravezetés állapotának felfedezése után nagymértékű hasznot kísérel meg húzni furcsa tulajdonságaiból.)

A jelenség felfedezése utáni évtizedekben számos anyagban, főleg fémekben és átmenetifém ötvözetekben mértek szupravezetést (**1. ábra**).

1933-ban *Meissner* és *Ochsenfeld* kimutatta, hogy a szupravezetők, melyeket addig csak ideális vezetőknek tartottak, kiváló diamágneses anyagok is. Felfedezésük szerint a szupravezetők kiszorítják magukból a mágneses teret. A külső mágneses tér bizonyos mértékéig, az úgynevezett kritikus mágneses mezőig, a szupravezetőkben teljesen kiszorul a mágneses fluxus (**2. ábra**).

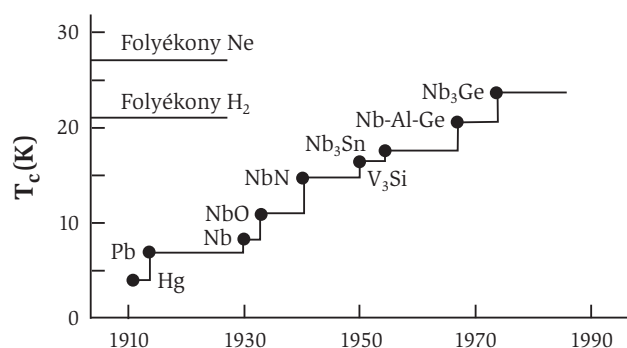


Ezt a jelenséget Meissner-Ochsenfeld-effektusnak vagy Meissner-hatásnak nevezik, és ez a mágneses lebegtetés (levitáció) alapja (3. ábra). (A szakirodalom sokszor a rövidebb Meissner-effektus nevet használja.) Ha a szupravezetőt gyenge mágneses térbe helyezik, a tér csak egy minimális  $l$  távolságra hatol be a szupravezetőbe, ez az úgynevezett behatolási mélység, ami után a mágneses térerősség nullára csökken. A legtöbb szupravezető esetén ez a mélység 100 nanométeres nagyságrendű. A Meissner-Ochsenfeld-effektus könnyen összetéveszthető az ideális vezetők diamágnességével. Lenz törvénye szerint a változó mágneses tér áramot indukál a vezetőben, és ezen áram által keltett mágneses tér pontosan az áramot létrehozó hatás ellen dolgozik. A Meissner-Ochsenfeld-effektus abban különbözik ettől, hogy a szupravezető a teljes mágneses teret kizárja – nem csak a változó teret –, ha kritikus hőmérséklet alá hűtik [3].

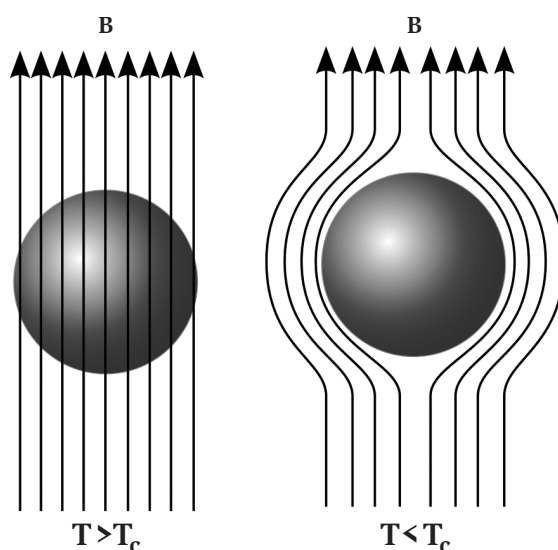
1940-ben London, 1964-ben pedig Josephson a szupravezetést már olyan kvantumjelenségnek tartotta, ami lehetővé teszi rendkívül érzékeny detektorok és ultragyors kapcsolók készítését. Számos alkalmazásuk jelentős hatással lehetett az energiagazdálkodás, az orvosi, kommunikációs, szállítási és védelmi iparágakra.

A továbbiakban ismertetett szupravezetési átmeneti hőmérsékletek ( $T_c$ ) 1967-től bekövetkezett jelentős növekedése előtt is – természetesen az új szupravezető anyagok, ötvözetek kémiai előállítási kísérleteivel párhuzamosan – főleg az elméleti fizikusok igyekeztek kutatásaikkal átfogóbb magyarázatot találni a szupravezetés jelenségére, illetve utat mutatni új szupravezető anyagok felfedezése felé.

Az első ilyen, úgynevezett mikroszkopikus elméletet Bardeen, Cooper és Schrieffer dolgozta ki 1957-ben, őket 1972-ben Nobel-díjjal jutalmazták az azóta BCS-elméletnek nevezett teória megalkotásáért [4]. Anélkül, hogy itt kitérnénk a részletekre, az elmélet mikroszkopikus elektron-fonon kölcsönhatási mechanizmussal értelmezi a szupravezetés eredetét és magyarázza az addig felfedezett szupravezetők tulajdonságait. Később azonban kiderült, hogy a BCS-elmélet nem segíti azokat, akik azt keresik, hogy hol és hogyan találjanak magasabb  $T_c$ -vel rendelkező szupravezetőket. Bár feltételezhető volt, hogy az erős elektron-fonon kölcsönhatás valóban elvezethet egy magasabb  $T_c$ -hez, de az ilyen túlságosan erős kölcsönhatás kedvezőtlen kristályszerkezeti átalakuláshoz is vezethet. Ennek megfelelően a BCS-elmélet alapján a kristályszerkezet átalakulását kiváltó, maximálisan elérhető 30 K (–240 °C) hőmérsékletet prognosztizáltak. Az új, magasabb  $T_c$ -jú szupravezetők további kutatására két út kínálkozott: a BCS-szemlélet elfogadása és az új szupravezetők keresésének leállítása az átmenetifém ötvözetek között, vagy empirikus úton keresni más, új szupravezető vegyületeket, anyagokat [5].

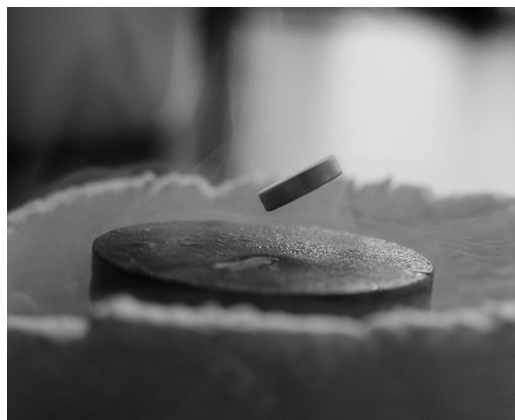
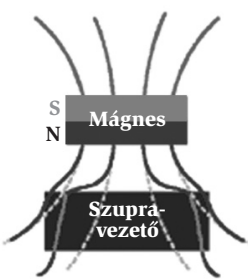


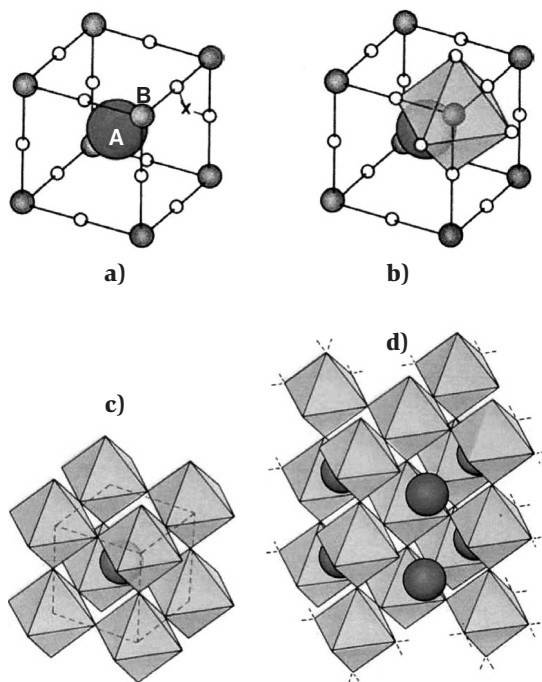
1. ábra. Szupravezetési átmeneti hőmérsékletek ( $T_c$ ) 1911 és 1985 között [13]



2. ábra. A Meissner-Ochsenfeld-effektus diagramja [3]

3. ábra. Szupravezetési mágneslebegtetés [6,7]





4. ábra. A perovszkit elemi szerkezeti egysége.

a) Egy fématom (A) a kocka középpontjában, nyolc kisebb fématom (B) a kocka sarkaiban és 12 nemfémes atom (X) a peremek középpontjaiban helyezkedik el. A krisztallográfusok a kockamodellt gyakran a poliéderessel helyettesítik (b). A hat X anion körbevesz és szorosan kötődik minden B kationhoz, és egy oktaéder csúcsait képezi. Ebben a modellben az A kationt körülvevő nyolc sarokkapcsolatos oktaéder csoportja képezi a szerkezeti alapegységet (c). A szilárd kristályt ilyen csoportok folyamatos hálózata alkotja (d) [15]

## Kémiai empíria és hőmérséklet-áttörés

Az előzőekben is említett intenzív nemzetközi kutatási tevékenység ellenére a fentiek értelmében még például 1986-ban is [9] le lehetett, vagy kellett írni azt, hogy: „At the extreme forefront of research in superconductivity is the *empirical* search for new materials [8]” (A szupravezetékutatás extrém frontvonalában az új anyagok *empirikus* keresése áll.) Időben visszaugorva képzeljük magunkat – az 1. ábrát nézve – a múlt századbeli hetvenes évek közepébe (például 1975-be), amikor az alkalmazási igények és remények megvoltak, de a BCS-elmélet kinyilvánította, hogy magasabb  $T_c$ -jú szupravezetőkhez az átmenetifém ötvözetek nem vezethettek. Ennek megfelelően a világ kutatóinak egyetlen további alternatívája az *empíria* maradt, azaz a kémiában akkor ismert vagy előállítható milliónyi vegyület, anyag vagy vegyületcsoport, anyagcsoport közül kiválasztani egyet vagy többet, és megvizsgálni, hogy az szupravezető-e. Egyszerűen kimondva az akkori kutatóknak meg kellett lovalogni a reményt, hogy jó helyen, jó irányban, jó időben keresse, kutassa az új szupravezetőket. Jelen szerző a szakirodalom vizsgálata alapján úgy találta, hogy az előbbi három ismerv alapján a jó hely a svájci IBM zürichi-rüschlikoni kutatóintézete, a jó irány a perovszkit-ásványok, illetve -kerámiák háza tája és a jó időpont a múlt századbeli nyolcvanas évek eleje volt. Ehhez persze nem kerülhet el azok megnevezése, akikre a fent említett lépések a hangsúlyozott *empirikus* kutatások jegyében vonatkoztak: K. Alex Müller és J. Georg Bednorz.

Mint a tudományos kutatásban kevés kivétellel, rájuk is érvényesült az a tétel, hogy megfelelő előzmények nélkül az akkor kezdődő vizsgálataik nem valósulhattak volna meg. Így például már 1964-ben az elődök felhívták a figyelmet a szupravezetés és a félvezetők közötti kapcsolat lehetőségére a  $\text{SrTiO}_3$  és  $\text{LiTiO}_3$  fém-oxidok kapcsán [9–12]. Részben ezeken az alapokon, de még mindig az *empíria* jegyében jutott Müller és Bednorz a forradalmi gondolatra, hogy a lehetséges megoldás kulcsát a fent említett oxidokat magukba foglaló perovszkitok és kerámiák körül kell(ene) keresni. Meglepő, hogy jelentős, fizikai Nobel-díjjal 1987-ben jutalmazott felfedezésük előzményeit és történetét nagyon részletesen

és aprólékosan leírt dolgozatukban [13] a fent említett kutatók egyszer sem említik az *empíria* szót, de a szó említésre kerül egy 1986-ban publikált dolgozatukban [9]. Ez természetesen utólagosan bocsánatos elhanyagolás vagy kihagyás, ugyanis az eseményt (felfedezést) utólag leírva sokkal könnyebben megteremthető az a logikus és következetes útvonal, ami a leírt eredmény *empíriás* úton való előzetes megközelítése során majdnem lehetetlen lett volna.

Az orosz geológus és ásványkutató von Perovskiról elnevezett perovszkitok (4. ábra) különleges atomszerkezetű természeti ásványok. Ezek képezik a Föld egyik leggyakoribb ásványcsoportját és magukban foglalnak körülbelül 150 szintetikus vegyületet is. A perovszkitásvány ideálisan kalcium-titanát ( $\text{CaTiO}_3$ ), de jelentős számú szubsztitúciós vegyülete létezik [14].

Bednorz és Müller munkahelyén, az IBM rüschlikoni intézetében két évtizeddel 1983 előtt is foglalkoztak már szigetelő fém-oxidok kutatásával. A  $\text{SrTiO}_3$  és a  $\text{CaAlO}_3$  perovszkitok képezték a modellvegyületeket a szerkezeti és ferroelektromos fázisátalakulások vizsgálatához. Így például Serway, Berlinger, Müller és Collins elektronrezonanciás spektroszkópiás eredményeket publikált [14] az átmenetifém szennyezésekről a perovszkitrácsban, és ezek alapvető rálátást nyújtottak ezen kristályok lokális szimmetriájára, azaz a  $\text{TiO}_6$  oktaéderekre, a perovszkitrács jellemző építőköveire. Ugyancsak Bednorz már a Zürichi Műszaki Egyetem (ETH) szilárdtest-fizikai kutatólaboratóriumában végzett PhD-kutatásai során, a rüschlikoni IBM-hez 1983-ban való átkerülése előtt, alacsony hőmérsékleten tanulmányozta a perovszkit szilárd oldatos szerkezeti és ferroelektromos tulajdonságait. Már ott tapasztalta ezen anyagok tulajdonságainak nagy változatosságát és azt, hogy a tulajdonságok összetételük módosításával mennyire változatosakká tehetők.

A kulcsvegyületet, azaz a tiszta  $\text{SrTiO}_3$ -ot a rácsból való parciális oxigéneltávolításos redukálással szupravezetővé is lehetett tenni, de az így előállított vegyület 0,3 K-es átmeneti hőmérséklete még nikkel hozzáadása után is túl alacsonynak bizonyult ahhoz, írta Bednorz és Müller, hogy felvillanyozza a világ szupravezetés-kutatóit. Az azonban, hogy a szupravezetés, bár csak jelentéktelen mértékben, de megjelenhetett egy *kémiai* változtatás után a különböző szinterelt kerámiás oxidkeverékekben, jelentősen befolyásolta Bednorz és Müller gondolkodását és további kutatásait. Ezek után fordult érdeklődésük a *réz-oxidok* (kuprátok) felé.

Emlékiratnak is nevezhető 1987. évi Nobel-előadásában, majd 1988-ban publikált összefoglalójában Bednorz és Müller [15] rendkívül vonzóan ismerteti többek között azokat a gondolatokat és kísérleteket, amelyek végül 1986. január 27-én elvezettek a

forradalmi szupravezetési hőmérséklet-növekedést mutató LaBaCuO, majd 1986 decemberében a LaSrCuO perovszkitkerámiákhoz. Az itt nagyon dióhéjban ismertetett, de alapos részleteket leíró összefoglalásban [13] és monográfiákban [2,5,16] leírtak esetében két tényező érdemel említést. Az egyik Bednorz és Müller laboratóriumi kísérletei nagy részének kimondottan *kémiai* jellege. Bővebben ez azt jelenti, hogy például a különböző szintetikus perovszkitvegyületek, beleértve a fent említett két kerámiát a komponens vegyületek sóiból koprecipitációval, illetve kalcinálással, szintereléssel, azaz *kémiai* úton kerültek előállításra. Mindez úgy, hogy a kutatók egyike sem volt kémikus, ugyanis Müllernek fizikusi, Bednorznak krisztallográfiai volt az alapképzettsége. A másik figyelemre méltó tényező: Müller és Bednorz – már a felfedezés birtokában és tudatában – 1986-ban nagy óvatosságról tanúskodott a publikálásaiban. Ezt ugyan valószínűleg az is motiválta, hogy a világ szupravezetésekkutatóinak jelentős volt a szkepticizmusa minden forradalmian új  $T_c$ -növelési eredményt mutató új vegyülettel szemben, főleg miután *McMillan* [17], az akkor már nagy tekintélyű BCS-elmélet alapján hangsúlyozta, hogy a szupravezetők kritikus hőmérséklete mintegy 30–40 K értéknél nem lehet nagyobb. Ennek megfelelően Müllerek egyik első, a LaBaCuO-t leíró dolgozatának címe az óvatos *Possible High  $T_c$  Superconductivity*-vel [8] kezdődik. A szkepticizmust még az is indokolta, hogy időnként a világban jelentkeztek olyan, a szupravezetésre alkalmas anyagok forradalmian új tulajdonságait leíró közleményekkel, mint például 1977-ben orosz (szovjet) kutatóknak a réz-klorid szupravezetését taglaló cikke [18], ami a független reprodukálási kísérletek során teljesen hamisnak bizonyult.

1987-ben publikált dolgozatában Bednorz és Müller [20] már határozottabb hangon írta le felfedezését, és említette az azóta világszerte elfogadott „*high  $T_c$  superconductivity*” kifejezést. Bár a „*low*” és a „*high*” jelölés természetesen relatív volt, a LaBaCuO felfedezésének két jellemzője vitathatatlan: több mint 10 K-nel megemelte a szupravezetés átmeneti hőmérsékletét, és lehetővé tette a hűtéshez a folyékony hélium helyett a folyékony hidrogén használatát. Ezért mindezeket teljesen indokoltnak látjuk *át-törésként* jellemezni. Bednorz és Müller eredményeit, amelyeket a LaBaCuO perovszkitkerámia szupravezetéséről publikáltak, sokaknak villámgyorsan sikerült reprodukálni számos helyen a világban.

## Verseny és prioritás

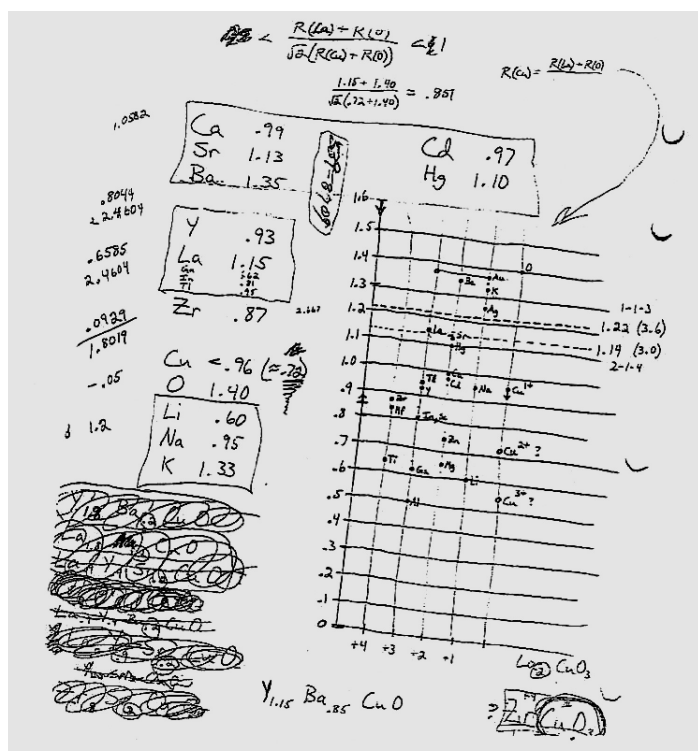
Bár mint a fent leírtak szerint a szupravezetés kutatása már a múlt század elejétől számítva sem volt elhanyagolt területnek mondható, Bednorz és Müller eredményeinek publikálása [8,9] szupravezetésekkutatási lavinát, cunamit indított el a világ országaiban. Ezért látjuk itt indokoltnak röviden a versengésre, a vetélkedésre és a prioritásra is kitérni a szupravezetők tudományos kutatásában.

Ehhez az egyik út az, hogy igénybe vesszük *Robert Merton* [21, 22] talán a valaha élt legjelentősebb tudományszociológus nézeteit, miszerint a verseny, versengés a tudományban, illetve a kutatásban a fejlődés egyik legjelentősebb velejárója. Mint ahogy annak velejárója az eredetiség és a prioritás is [21]. Egy felfedezés, illetve az elért eredmény tulajdonjogát és elfogadását a kutatók természetesen saját maguknak igyekeznek vindikálni, annak minden morális és anyagi előnyével együtt. Mint említettük, a fentiekben a versengés a kulcsszó, amikor egészen különleges elismerések, mint a Nobel-díj vagy a kutatásokat finanszírozó anyagiak elérése is felmerülnek; a versengés helyett már a harc, csata vagy küzdelem fogalma is szóba kerül, mint azt bizonyos mértékben és más téma kapcsán már bemutattuk [24], és a továbbiakban itt is bemutatjuk. A magas hőmérsékletű szupravezetés első lépésének prioritása a reprodukálhatóság igazolása után Bednorz és Müller javára 1987-től kezdődően világszerte elismerésre talált. A fentebb említett lavina elindult, a reprodukálás után újabb, még magasabb hőmérsékleten működő vegyületek empirikus, de már Bednorz és Müller nyomdokain haladó előállítás útján. Mindezt megtoldva azzal a kinyilvánított véleménnyel, miszerint a szupravezetés kutatási területén is „minden időben a kutatók elképzelt önállóságuk okán és állandó irigység folytán, gladiátorhelyzetben fegyvereiket és gyanakvó pillantásukat egymásra szegezve, háborús képzetben élnek” [25].

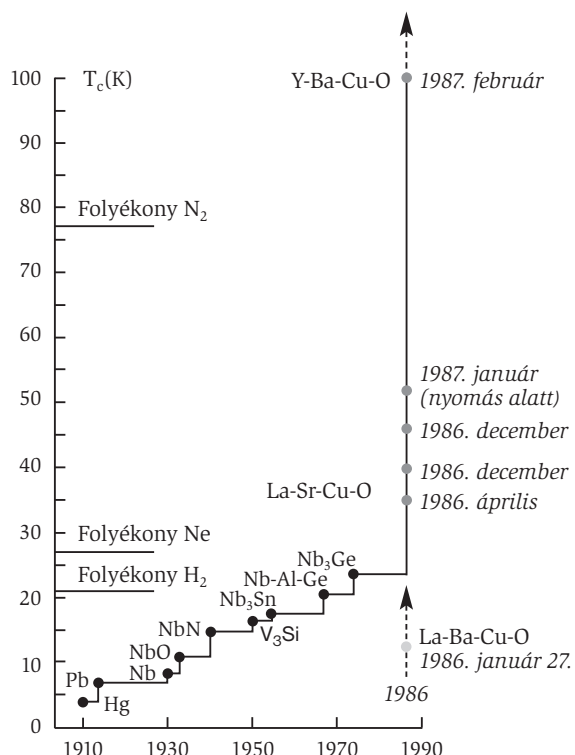
## Az igazi nagy hőmérséklet-átörés

Arra természetesen nincs itt sem helyünk, sem lehetőségünk, hogy a Bednorz és Müller 1986-beli felfedezése által fentebb már említett kutatási és publikálási lavinát részleteiben is ismertessük. Ezért a témáról szóló monográfiák [16,30] szerint a Bednorzot és Müllert követő versenytársak közül foglalkozunk itt azokkal, akik a legjellemzőbbeknek bizonyultak. Ezek közül a leginkább *Shoji Tanaka* (Tokiói Egyetem), *Paul Chu* (Houstoni Egyetem) és *Maew-Kuen Wu* (Alabama Egyetem) kerültek említésre. Publikálásban valószínűleg Tanaka tokiói csoportja jelentkezett elsőnek [26]. Ők a BaPbBiO perovszkitkerámia szupravezetését vizsgálták. Azonban 1980 közepére – negatív eredményeik hatására – türelmük határához értek, és az empiria jegyében éppen új vegyület keresésébe fogtak. Az 1987-ben publikált Bednorz és Müller- [20] cikk olvasása után villámgyorsan reprodukálták annak eredményeit, kiegészítve pozitív Meissner-effektusi mérésekkel. Paul Chu és csoportja, hogy a versengés stílusában fogalmazunk, az új szupravezetők keresésében ott lihegett Bednorzéék és Tanakaék nyakában. Ő Kínában *Ching-wu Chuként* született, majd Tajvanon nevelkedett, és később a San Diego-i University of Californián PhD-fokozatot szerezve változtatta a nevét immár Paul Chura [27]. Chu csoportja reprodukálta és igazolta Bednorz és Müller LaBaCuO perovszkitkerámiával elért eredményeit, és kimutatta, hogy a szinterelt anyag hidrosztatikus nyomás alatt egy Kelvin-fok  $T_c$ -növekedést mutat egy kilobar nyomásnövelés hatására. Ezáltal 13 kilobarnál elérték a 40 K  $T_c$ -hőmérsékletet [28]. Folytatásként Chu és csoportja a mások által nagyon részletesen leírt empirikus kísérletezéseket folytatta az eredeti LaBaCuO perovszkitkerámia egyes elemeinek ritkaföldfém és alkáliföldfém elemekkel való helyettesítésével (például La Y, Ba Sr) [5,16] **(5. ábra)**. 1987. január 12-én Chu egyesült ál-





5. ábra. Oldal Chu jegyzetfüzetéből, empirikus perovszkit-vizsgálatai során [33]



6. ábra. Szupravezetési átmeneti hőmérsékletek ( $T_c$ ) 1911 és 1990 között [13]

lamokbeli szabadalmi igényt is benyújtott több új ritkaföldfém, illetve alkáliföldfém perovszkitkerámia anyagra, köztük az YBaCuO-ra, akkor még vegyes eredmények alapján.

1987. január 17-én Chu egyik végzős hallgatója, *Maew-Kuen Wu*, aki már a huntsville-i Alabamai Egyetemen kutatott, úgy találta [29], hogy az ittriumot tartalmazó vegyület különösen biztatónak ígérkezik, de ittriumot éppen akkor nem találtak a laborban. A Huntsville közelében fekvő Marshall Space Flight Centerben találtak ebből a ritkaföldfém-ből, és Wu és munkatársai szilárd fázisban porították, keverték (!), kalcinálták (!), illetve szinterelték a finoman porított ittrium, bárium-oxidok és bárium-karbonát, illetve réz-oxid sztöchiometriás keverékét. 1987. január 29-én délután Wu felhívta Alabamából Chut, és közölte: „We have hit the jackpot” (megüttük a főnyereményt) [29]. Wu még aznap Huntsville-be repült a mintával Chuhoz, ahol rögtön elvégezték a mindent igazoló mágneses szuszeptibilitási és a Meissner-effektus-méréseket is. A kemencéből előkerült kerámia szemmel láthatóan két különböző kristálytípust mutatott a nagy felbontású optikai mikroszkópban. Az egyik fázis zöld színű, kerekített élű, a másik fekete, átlátszatlan, szabályosabb és szögletesebb szélű kristályokból állt. Bár feltételezték, hogy a fekete fázis a szupravezető, mert ismert volt, hogy a legtöbb szupravezető anyag fekete és átlátszatlan, Chu bizonyosságot akart arról, hogy a két fázis közül melyik a valódi szupravezető tulajdonságú. A kérdést azonban csak úgy lehetett tisztázni, ha a mikroszkopikus méretű kristálykeveréket krisztallográfus szakember diffraktometriás mérésekkel megvizsgálja.

Chu és munkatársai, akik fizikusok és nem krisztallográfusok voltak (emlékezzünk rá, hogy e dolgozat elején említettük, hogy Bednorznak is a krisztallográfia volt a szakterülete), tartottak attól, hogy amennyiben a kristálymintát olyan helyre küldik a diffraktometriás és elektron-mikroszkopos vizsgálatok elvégzésére, ahol mint említettük, szintén részt vesznek az egyre magasabb hőmérsékletű szupravezetők világszerte terjedő kutatási hajszájában, akkor prioritási igényeik, publikálatlan eredményekről lévén szó, veszélybe kerülhetnek. Ezért e célra a washingtoni Carnegie Intézet geofizikai laboratóriumában dolgozó *Robert M. Hazen* mineralógust [30] és munkatársait kérték fel, mert őket jó nevű, elismert diffraktometriás szakemberekként ismerték, de tudták róluk, hogy sokan másokkal ellentétben nem foglalkoznak új szupravezető anyagok, kerámiák, vegyületek keresésével. Hazenék rövidesen igazolták, hogy az YBaCuO zöld kristályok  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  összetételűek, míg a feketéket a mindent eldöntő magas hőmérsékletű, oxigénhiányos  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , azaz a legendás 1-2-3 összetételű fekete, átlátszatlan kristályok képezik. Az eredményeket Chu, Wu és munkatársaik két közös cikkben írták le 1987-ben [31, 32]. A kéziratokat Chu 1987 februárjában küldte be a *Physical Review Letters* folyóirat szerkesztőségébe, és a cikkek a folyóirat 1987. márciusi számában jelentek meg [31, 32].

A prioritási, illetve publikálási versenyfutásra [30] a legjellemzőbb példát Chu mutatta be, amikor a *Physical Review Letters*-hez beküldött két cikk [31,32] kéziratában említett két vegyületet állítólag szándékos megtévesztésként YbBaCuO-ként (Yb!) írta le, és titkárnői gépelési hibára hivatkozva csak a cikk korrektúrájakor, 11 órával a megjelenés előtt módosította az Yb-ot Y-ra. A fáma szerint azért, mert tartott attól, hogy a folyóiratnál a szerkesztés közben az új perovszkit képlete (és a felfedezés híre) kiszivárog a *Phys. Rev. Lett.* szerkesztőségéből. Hazen könyvében említi a fentieket és azt is, hogy ő (Hazen) utólag kérdezte erről Chut, hogy így történt-e, de Chu megtagadta a választ [30].



## A fizika Woodstockja

Az Amerikai Fizikai Társaság (American Physical Society, APS) 1987. március 16. és 20. között, a New York-i Hilton szállodába tervezte évi rendes szilárdtest-fizikai konferenciáját. Látvá az 1987. elejére megjelent szupravezetési cikklavinát, a társaság utólag döntött úgy, hogy az évi közgyűléshez egy last-minute szekciót csatol, amiben lehetőséget nyújt a szupravezetés témában elért legeslegújabb eredmények bemutatására. A szekció előadásait az Amerikai Fizikai Társaságon belül működő History of Physics Division szervezésére bízták, az előkészítésre 1987. március 17-én került sor, és ott részletesen számba vették a szupravezetés közelmúltbeli eredményeit [34]. Az igazán különleges, a szupravezetés történetében mérföldkönek emlegetett esemény a New York-i Hilton szállóban március 18-a délutánja volt, amikor délután fél hat körül a szálló báltermében körülbelül 2000 kutató szorongott, és körülbelül ugyanannyian tolongtak a kinti televízió-képernyők körül és a szomszéd helyiségekben. A szekció ülése fél nyolctól hajnali három óráig tartott, és az említett teremben az előadások közben a hallgatók még a csilláron is lógtak azért, hogy meghallgathassák az Ames, Brookhaven, Los Alamos, AT&T Labs, Tokió, Huntsville, Houston és Carnegie Intézet kutatóhelyeken működő szupravezetésekkutatató csoportok vezetőinek eredményeit legújabb kutatásaikról [16].

Az Amerikai Fizikai Társaság márciusi konferenciájára 3080 ösztöfoglalót küldtek be, közülük számosat, főleg a magas hőmérsékletű szupravezetőkkel foglalkozókat csak az ülés előtti pillanatokban. Előadásaikhoz a kulcsemberek, például Alexander Müller és Paul Chu 10 perc időt kaptak a rendezőtől, a többiek csak 5-5 percet. A magas hőmérsékletű szupravezetőkéről 51 előadás hangzott el az 1987. március 18-i ülésen, és azt az 1969-ben Woodstockban tartott, sokak számára még ma is emlékezetes zenei és művészeti woodstocki fesztivál nyomán azóta is a fizika Woodstockjaként emlegetik [35].

## Nobel-díj, 1987

A fenti eredményeket követően a Stockholmi Nobel-bizottság 1987 novemberében Johannes Georg Bednorznak és Karl Alex Müllernak megosztva ítélte az 1987-es fizikai Nobel-díjat „a kerámiákban történő szupravezetéssel kapcsolatos úttörő felfedezésekért” [36]. Tették ezt annak ellenére, hogy a Nobel-bizottság nem arról híres, hogy elkapkodja a díj, illetve a díjazott(ak) kijelölését, illetve nagyon gyorsan tiszteli meg a díjjal a felfedezőt, ugyanis néha, nem is kevészer, a díjat sok év, sőt évtized után adják ki. Bednorz és Müller esetében a megtiszteltetés villámgyorsan következett be. Az, hogy Bednorz és Müller mellett mások is rászolgáltak volna-e a díjra, például Chu és Wu, még ma is nyitott kérdés. A **6. ábrán** látható, hogy Chuék az YBaCuO perovszkitkerámia felfedezésével a  $T_c$ -t 100 K körüli értékre emelték. Itt talán Chuék felfedezésének még populárisabb alátámasztására megemlítenéd, hogy míg a folyékony hélium literje például az ötcsillagos Hennessy konyak árával (6-14 ezer Ft), addig a folyékony nitrogén literjének ára egy liter tejével (200-400 Ft) egyenlő.

Hazen könyvében még azt is megemlíti, hogy azzal, hogy a Nobel-bizottság Bednorzot és Müllert már 1986 végén jelölte az 1987. évi fizikai díjra, eleve kizárta Chut a jelölésből, ugyanis az 1987. évi jelölés határideje 1987. január vége volt, viszont Chuék cikkei [31,32] csak 1987 márciusában jelentek meg. Mások Chut is Nobel-jelöltnek feltételezték, mint azt a *Houston Chronicle* amerikai napilap február 16-i számának címlaphíre is bizonyítja (**7. ábra**). A Nobel-bizottság mostoha álláspontját Chu teljesítményével szemben a kiváló amerikai folyóiratban, a *Science*-ben már 1988-ban is szóvá tették [33]. Az igazság kedvéért meg kell említeni, hogy később azért Chu sem maradt elismerések nélkül. Kitüntették az *US National Medal of Science*-szel, a *Comstock Prize in Physics*-szel (1988-ban), az *American Physical Society International Prize for New Materialsszal* és a *US News and World Report* folyóirat öt választotta a *Best Researcher in the US*-nek [27].

## A szupravezetés elmélete körüli krízis

A bevezetésben már említett, 1957-ben kidolgozott BCS-elmélet óta – főleg fizikusok részéről – számos próbálkozás történt a szupravezetők működésének magyarázatára, beleértve azt, hogy elméleti alapon hogyan és hol lehet új szupravezető anyagokat, vegyületeket keresni, illetve találni. Itt e kérdés részleteivel nem kívánunk foglalkozni. Érdeklődő kutatóknak kitűnő összefog-



7. ábra. Az amerikai Houston Chronicle című napilap 1987. február 17-i számának címlapja [30]

lálók állnak rendelkezésre, ezek címei is igazolják azt a tényt, hogy a szupravezetés minden elméleti fizikus által elfogadott magyarázata mindmáig nem született meg. Tanaka írta 2001-ben: „Az elektron-fonon, spin-spin kölcsönhatások, töltéssűrűség-hullámok, spinsűrűség-hullámok és más kölcsönhatások rendszerében olyan sok kölcsönhatásféle alakulhat ki, hogy csak most (2001-ben) kezdjük megérteni az ilyen komplex rendszerek fizikáját” [37]. Ez a vélemény 2006-ban sem változott. Akkor azt írták: „High- $T_c$ : The mystery that defies solution” (Magas  $T_c$ : a megoldhatatlan rejtély) [38]. Ugyanez volt a helyzet 2011-ben: „Huszonöt évvel a felfedezés után, a magas hőmérsékletű szupravezetésre még mindig nincs megfelelő magyarázat” [39]. Sőt még 2013-ban sem, amikor az elméleti fizika két Nobel-díjas titánja, Laughlin és Anderson egymás szupravezetési elméletét bírálva összeecsap, „Amid Superconductor Debate, Clash of Physics Titans Resumes” (8. ábra) [40]. Egyikük (Laughlin) 2014-ben publikálta legújabb elméletét [41,42].

Ezekről még publikálásuk előtt írta Cho: „Robert Laughlin, the Nobel laureate at Stanford University in Palo Alto, California „argues” in a pair of papers that most physicists’ basic assumptions about the origins of high-temperature superconductivity ... are wrong” [40]. Valószínűleg az érdekesség kedvéért érdemes a fentiek mellett megemlíteni itt Jorge Hirsch amerikai fizikust is.

Az Argentínában született Jorge E. Hirsch [43] 1980-ban védte meg PhD-jét a University of Chicagón. Jelenleg a University of San Diego professzora, ahol oktatással és tudományos kutatással foglalkozik. Kutatási területe a szupravezetés és ferromágnesesség. Egy 1989-ben tartott konferencián előadott dolgozatban Hirsch azt állította, hogy az alacsony hőmérsékletű szupravezetés általánosan elfogadott BCS-elmélete alapvetően téves. Abban az időben Hirsch még zöldfülű ismeretlennek számított a fizika nemzeti és nemzetközi társadalmában. Tudvalevő, hogy a tudomány ritkán bocsátja meg vagy nézi el az ilyen szentségtörést. Időromboló előadása után a hasonló konferenciák tartózkodtak Hirsch meghívásától, a kollégák nem keresték együttműködéshez, a támogatások, ösztöndíjak elmaradtak, a nagy olvasottságú folyóiratok visszautasították kéziratát. Egy előző dolgozatunkban [44] hipotézisként kezeltük azt a feltételezést, amely szerint a fenti események hatására történő frusztráció készítette, motiválta Hirscht, hogy az azóta róla elnevezett [45] indexét megalkossa. Nem ennyire expliciten és természetesen – az indexe megemlézése nélkül – Hirsch is leírja szélmalomharcát és frusztrációját egy az Interneten publikált cikkben, amiben saját, a szupravezetést magyarázó, de mások által máig el nem fogadott elméletéről is említést tesz [46]. Őt az frusztrálja, hogy a szupravezetéssel foglalkozó kéziratát nem voltak hajlandók közölni az olyan nagy olvasottságú folyóiratok, mint a *Nature*, a *Science* vagy a *Physical Review Letters*. Nevezhetjük a sors különös fintorának, hogy míg a szupravezetés területén Hirsch kutatásai csak ellenérzéseket keltettek, addig az ArXiv elnevezésű adatbázisban 2005-ben közzétett cikk már a megjelenését követő napokban szokatlan figyelmet kapott a tudományos médiában [47,48], és írásbeli reagálások, cikkek, elemzések, kommentárok valóságos özönét indította el, ami napjainkban is tart. Ehhez az is hozzájárult, hogy az eredeti cikk változatlan szöveggel 2005. november 15-én a világ egyik legtekintélyesebb folyóiratában is megjelent [49].

Mindez oda vezetett, hogy Hirsch, illetve az általa kreált index megkapta a lehető legnagyobb (tudományos), még a Nobel-díjnál is nagyobb megtiszteltetést, amit tudományos kutató megkaphat: eponimává vált.

Az *eponima* kifejezés a görög *epi* (jelentése: -ról, -ről) és *onima* (jelentése: név) szavakból származik. A tudomány területén számos híres elmélet, törvény, hatás, elv stb. eponim, vagyis azokról a kutatókról van elnevezve, akik javasolták, vagy felfedezték ezeket. Merton meghatározása szerint az eponima „az a szokás, miszerint a kutató nevét odaillesztjük a felfedezéshez, vagy annak egy részéhez, mint például kopernikuszi rendszer, Hook-törvény, Planck-állandó vagy Halley-üstökös”. Az eponima számos funkciót szolgál, ráirányítja a figyelmet a jelzett fejlődésre, követendő példaként nevezi meg a kutatókat és motiválja a kutatást az elért eredmény jutalmazásával [50]. Persze, mindez valószínűleg hozzájárul Hirsch lelki megnyugvásához, de egy lépéssel sem hozza közelebb a szupravezetés fizikai elméletének jobb megértését. Az azonban nyugodtan kijelenthető, hogy a magyarázat hiánya ellenére a magas hőmérsékletű szupravezetésnek számos gyakorlati alkalmazása alakult ki az utóbbi időben. Helyhiány miatt itt ezekkel sem foglalkozunk részletesen, de utalunk egy figyelemre méltó összefoglalóra [37].

## Végszó

E dolgozat előszavában körvonalaztuk azt, amivel a szupravezetés, különösképpen a magas hőmérsékletű szupravezetés témakörében foglalkozni kívántunk. Az ismertetésben a szupravezetés és szupravezetők képezték figyelmünk központját, de a hangsúlyt végig a kutatásukra helyeztük, azaz arra a társadalmi tevékenységre és annak emberi részleteire, aminek eredményeként e kérdésben ismereteink s tudásunk alakult és fejlődött.

A LaBaCuO és a YBaCuO perovszkitkerámiákkal elért hőmérsékletek kutatása alatt és után az empíria jegyében számos más anyag, vegyület szupravezetését derítették fel részben új perovszkitok formájában (BiSrCaCuO; HgBaCaCuO; TlBaCaCuO; HgTlBaCaCuO; HgBaCaCuO), de más összetételű vegyületek esetében is (Cs<sub>3</sub>C<sub>60</sub>; MgB<sub>2</sub>; FeAs; RbCsC<sub>60</sub>). Mindez azon végső cél elérésének a jegyében, hogy végül majd empirikus, vagy elméleti alapon a kutatás felfedezze az ideális, pontosabban a szobahőmérsékleten szupravezető vegyületet, anyagot. Mint látható volt, a szupravezetőkutatás egy körülbelül 300 K hőmérsékleti skála keretében folyt. Ezen az eddigi körülbelül 100 év alatt sikerült körülbelül a skála feléig (körülbelül 150 K) eljutni. Ezért állíthatjuk, hogy a szupravezetőkutatás végső sikeréig terjedő út felénél tartunk, és ezért szerepel a „félút” jelen dolgozat címében.

Nem hisszük, hogy lenne bármilyen tudományosnak mondható alap ahhoz, hogy jelenleg bárki megkísérelje megjósolni, hogy mennyi időt igényel a kutatás az út második felének megtételéhez. Nem tekinthetjük lehetetlennek, hogy ez az idő nagyon rövid lesz, de azt sem, hogy legalább annyi időt igényel majd, mint az út első fele. Bármilyen rizikós is, annyit megjegyezhetünk, hogy

## Félúton a magashőmérsékletű szupravezetők kutatásában

a szupravezetés kutatásában még benne van a tizenötödik Nobel-díj. Utalnánk itt *Niels Bohr* közismert mondására, ami szerint „nehéz előre látni, főleg a jövőt”.

Önigazolásként álljon itt egy nemrég megjelent vélemény: „For over a century, physicists have tantalized engineers with just the thing: superconductors. But most superconductors work only at temperatures close to absolute zero. Despite sustained efforts, we are still only *halfway* to a superconductor that works at room temperature” [50].

És végül érdekességként visszatérve a 15. Nobel-díjra, annak – több véleményre támaszkodva – jelöltje a 2007-ben felfedezett szupravezető topológiás szigetelők szakértője, a kaliforniai Stanford Egyetemen kutató *Shoucheng Zhang* [51].

### IRODALOM

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Heike\\_Kamerlingh\\_Onnes](http://en.wikipedia.org/wiki/Heike_Kamerlingh_Onnes)
- [2] A. Mourachkine, Room-Temperature Superconductivity, Cambridge International Science Publishing, 7 Meadow Walk Great Abington, Cambridge CB1 6AZ, UK, 2004.
- [3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Mei%C3%9Fner-Ochsenfeld-Effekt>
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/BCS\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/BCS_theory)
- [5] D. D. L. Chung (ed.) The road to scientific success: inspiring life stories, vol. 1, World Scientific. Boca Raton, 2006, 214.
- [6] [http://www.ithaca.edu/depts/gallery\\_img/8638\\_full.jpg](http://www.ithaca.edu/depts/gallery_img/8638_full.jpg)
- [7] [http://physics.ithaca.edu/~physics/Seminars/PhysicsCafe/2009-SP-IMAGES/sc\\_levitation\\_S07.jpg](http://physics.ithaca.edu/~physics/Seminars/PhysicsCafe/2009-SP-IMAGES/sc_levitation_S07.jpg), <http://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/groups/amks/superconductivity/levitation/lines.gif>
- [8] J. G. Bednorz, K. A. Müller, Possible high  $T_c$  superconductivity in the La-Ba-Cu-O system, Z. Phys. B., Condensed Matter (1986) 64, 189.
- [9] M. Tinkham, M. R. Beasley, D. C. Larbalestier, A-F. Finnemore, Workshop on Problems in Superconductivity, Copper Mountain, Colorado, August, 1983, 12.
- [10] M. L. Cohen, The existence of a superconducting state in semiconductors, Rev. Mod. Phys. (1964) 36, 240.
- [11] J. F. Scholey, W. R. Hosler, M. L. Cohen, Superconductivity in semiconducting  $\text{SrTiO}_3$ , Phys. Rev. Lett. (1964) 12, 474.
- [12] E. S. Edelsack, The rocky road to superconductivity, Compilation at NRL Publications on high temperature superconductivity, Naval Research Laboratory, 1987.
- [13] J. G. Bednorz, K. A. Müller, Perovskite-type oxides. The new approach to high- $T_c$  superconductivity, Rev. Mod. Phys. (1988) 60, 585.
- [14] R. A. Serway, W. Berlinger, K. A. Müller, R. W. Collins, Electron paramagnetic resonance of three manganese centers in reduced  $\text{SrTiO}_3$ , Phys. Rev. B (1977) 16, 4761.
- [15] R. M. Hazen, Perovskites, Sci. American (1988) Jun., 52.
- [16] P. F. Dahl, Superconductivity. Its historical roots and development from mercury to ceramic oxides, American Institute of Physics, New York, 1992.
- [17] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Szupravezet%C3%A9s>
- [18] A. P. Rusakov, S. G. Grigoryan, A. V. Omel'chenko, A. E. Kadyshchik, Isomorphic phase transitions in CuCl at high pressures, Soviet Physics (JETP) (1977) 45, 380.
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature\\_superconductivity](http://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductivity)
- [20] J. G. Bednorz, M. Takashige, K. A. Müller, Susceptibility Measurements Support High- $T_c$  Superconductivity in the La-Ba-Cu-O System, Europhys. Lett. (1987) 3, 379.
- [21] R. K. Merton, Priorities in scientific discovery, Amer. Sociol. Rev. (1957) 22, 635.
- [22] R. K. Merton, The sociology of science, Chicago University Press, Chicago, 1973.
- [23] [http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific\\_priority](http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_priority)
- [24] Braun Tibor, A DNS leképezése vízben: valóság vagy patológiás tudomány? Hadtudósítás egy vitatott kutatási téma frontvonaláról, Magyar Kémikusok Lapja (2014) 69, 27.
- [25] Th. Hobbes, Leviathan (1651) Reprinted 1952, Chicago: Encyclopedia Britannica, Inc. Great Books series, vol. 23, 86.
- [26] S. Tanaka, Research on high- $T_c$  superconductivity in Japan, Phys. Today (1987) 53–58.
- [27] [http://en.wikipedia.org/wiki/Chu\\_Ching-wu](http://en.wikipedia.org/wiki/Chu_Ching-wu)
- [28] C. W. Chu, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, Evidence for superconductivity above 40 K in the La-Ba-Cu-O compound system, Phys. Rev. Lett. (1987) 58, 405.
- [29] R. Pool, Superconductor credits bypass Alabama, Science (1988) 241, 655.
- [30] R. M. Hazen, The breakthrough: The race for the superconductor, Amazon Books Editors, 1988, <http://www.amazon.com/The-Breakthrough-Race-Superconductor/dp/0671658298>
- [31] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, C. W. Chu, Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure, Phys. Rev. Lett. (1987) 58, 908.
- [32] P. H. Hor, L. Gao, R. L. Meng, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, K. Forster, J. Vassiliou, C. W. Chu, M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, High-pressure study of the new Y-Ba-Cu-O superconducting compound system, Phys. Rev. Lett. (1987) 58, 911.
- [33] R. Pool, Superconductor credits bypass Alabama, Science (1988) 241, 655.
- [34] P. F. Dahl, James Dewar, Walter Nerust and Heike Kamerlingh Onnes in events leading to superconductivity in 1911, G. Baym, Quantum theories of superconductivity, 1929–1933, R. Schrieffer, The development of the microscopic theory of superconductivity, P.W. Anderson, Its not over.... the fat lady sings, Bull. Am. Phys. Soc. (1987) 32, 619.
- [35] [http://en.wikipedia.org/wiki/Woodstock\\_of\\_physics](http://en.wikipedia.org/wiki/Woodstock_of_physics)
- [36] [http://hu.wikipedia.org/wiki/Fizikai\\_Nobel-d%C3%ADj](http://hu.wikipedia.org/wiki/Fizikai_Nobel-d%C3%ADj)
- [37] S. Tanaka, High-Temperature Superconductivity: History and Outlook, IASP (2001) 4, 17.
- [38] A. Cho, High  $T_c$ : The Mystery That Defies Solution, Science (2006) 314, 1072.
- [39] P. M. Grant, The great quantum conundrum, Nature (2011) 476, 37.
- [40] A. Cho, Amid Superconductor Debate, Clash of Physics Titans Resumes, Science (2013) 342, 1427.
- [41] R. B. Laughlin, Fermi-Liquid Computation of the Phase Diagram of High- $T_c$  Cuprate Superconductors with an Orbital Antiferromagnetic Pseudogap, Phys. Rev. Lett. (2014) 112, 17004.
- [42] R. B. Laughlin, Hartree-Fock Computation of the High- $T_c$  Cuprate Phase Diagram, Phys. Rev. B. (2014) 89, 35134.
- [43] [http://en.wikipedia.org/wiki/Jorge\\_E.\\_Hirsch](http://en.wikipedia.org/wiki/Jorge_E._Hirsch)
- [44] Braun Tibor, Egy tudományos kutató frusztrációjának következménye: a Hirsch-index, Magyar Tudomány (2009) 8, 965.
- [45] J. E. Hirsch, An index to quantify an individual's scientific output, arXiv: physics/0508025, 2005.
- [46] J. E. Hirsch, BCS theory of superconductivity: the world's largest Madoff scheme, arXiv: physics.gen-ph/ 0901.4099, 2009.
- [47] Editorial: Rating games, Nature (2005) 436, 889.
- [48] T. Braun, The Hirsch-Index for evaluating science and scientists. Its uses and misuses. Scientometrics Guidebooks Series, vol 3, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [49] J. E. Hirsch, An index to quantify an individual's scientific output, Proc. Nat. Acad. Sci. (USA) (2005) 102, 16569.
- [50] R. Webb, Wonder stuff. Leaner, greener technologies depend on some intriguing materials. New Scientist probes seven revolution-in-waiting, New Scientist (2014) 11 October, 36.
- [51] [http://en.wikipedia.org/wiki/Shoucheng\\_Zhang](http://en.wikipedia.org/wiki/Shoucheng_Zhang)



# Napenergia-felhasználási remények

## A perovszkitkutatás másodvirágzása: hibrid perovszkit napelemek

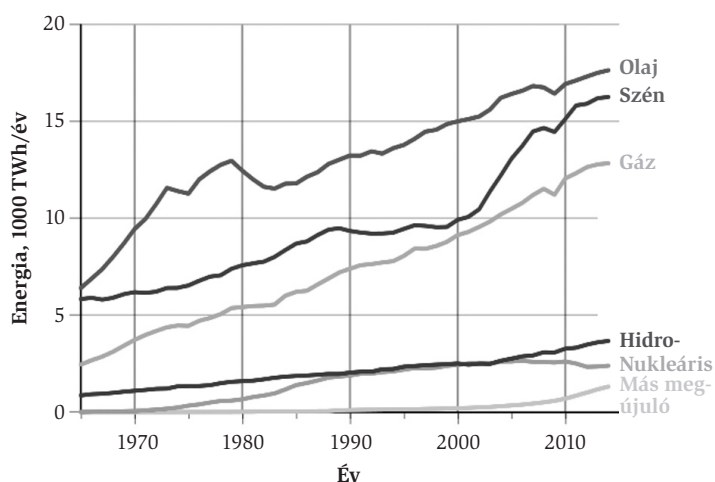
### Bevezetés

Közhelyszerű ismeretnek számít, hogy a világ energiafelhasználása (**1. ábra**) a fosszilis energiaforrások vonatkozásában folyamatos növekedést mutat, és tartalékait világviszonylatban körülbelül 0,4 zetajoule-ra ( $4 \times 10^{23}$  joule) teszik. A nem is olyan beláthatatlan jövőben ezek kimerülhetnek. A fentiek ismeretében valószínűleg nem tűnik érdektelennek egy pillantást vetni a világ globális energiapotenciáljára, mint azt a **2. ábra** bemutatja. Egyszerű rátekintés alapján is megállapítható, hogy milyen korlátlan felhasználhatósági esélyeket nyújthatnának az úgynevezett megújuló, megújítható energiaforrások, amik közé elsősorban a napenergiát, a vízenergiát, a geotermikus energiát és a biomasszát sorolhatjuk [3]. Ha már itt az elején előkerült a napenergia, és a továbbiakban is a dolgozat címéből és a következőkből is kiderül, reményeket fűzünk hozzá, hadd retrospekciózzunk egy nagyot. Nem távolabbra a múltban, mint a tizenötödik század Dél-Amerikájáig, ahol az inka birodalom (1430–1533) és vezetője, királya, az *Inka* és népe, az inkák tudhattak (vagy előre láthattak) valamit, mert istenként imádták *Inti*-t, a napot. A mai Ecuador, Chile, Peru, Bolívia, Kolumbia, Argentína nagy részét magába foglaló, milliós hadsereggel bíró, napistenüknek gyakran emberáldozatokat is bemutató inka birodalmat *Inti*, a napisten sem tudta megmenteni attól, hogy *Pizarro* spanyol kalandor (konkvisztádor) néhány tucat állig felfegyverzett lovas martalócaival, jól bejáratott spanyol furfanggal és álszent ígéretekkel meggyilkolja az *Inkát*, szét ne verje az inka birodalmat és a spanyol perui alkirályság igájába hajtja *Inti napisten* védenecit [4]. Amire e kitérővel utalunk az az, hogy istenként manapság ugyan nem kell tisztelnünk a napot és a belőle áradó energiát, és emberáldozatot nem, legfeljebb befektetési tőkeáldozatot kell hoznunk, amivel megkísérelhetjük, mint azt a továbbiakban körvonalazottakban tesszük is, energiáját a magunk javára fordítani, felhasználni.

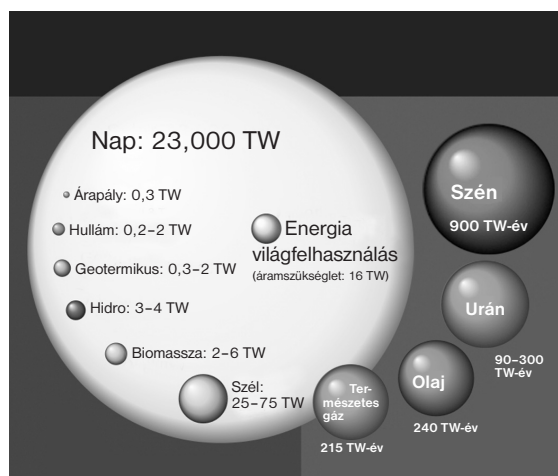
A nap földünk minden négyzetméterét több mint 1360 terawattnyi energiával sugározza be. Ennek a felét elnyeli a légkör, vagy visszareflektálódik az űrbe. Körülbelül 700 terawattnyi energia viszont eléri a földünk felületét. Összegezve, a föld azon részét, amit a nap süt, körülbelül 89–90 pentawatt energia éri el. Összehasonlításképp egész emberi civilizációnk energiafelhasználása körülbelül 15 terawattot, azaz ennek hat ezrelékét jelenti. Vagyis 14,5 másodperc alatt a nap annyi energiával látja el a földet, amennyit az emberiség jelenleg egy nap alatt használ. Még egy napenergia-hasznossági példával tetéztve, illetve másképp mondvá ez körülbelül annyi, mint 4 trillió 100 wattos villanykörte működtetési igénye. Talán nem felesleges itt e téren visszaemlékezni *Nikola Tesla* zseniális szerb feltalálóra, aki már 1915-ben elvileg átlátta a fentieket (**3. ábra**)

Amennyiben az emberiség rögzíteni és fel tudná használni a földet érő napenergia egyetlen százalékát, azaz a sugárzás ezredrészét, az hatszor annyi energiafelhasználási hozzáférést jelentene, mint amennyit összes változataiban ma felhasználunk. Mindezt csaknem teljesen üvegházi gázkibocsátás nélkül. Ennek megfelelően a világ K+F tevékenysége már eddig is jelentős erő-

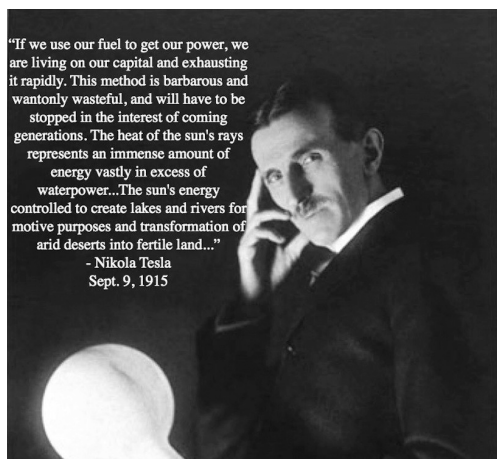
1. ábra. A világ energiafogyasztása [1]



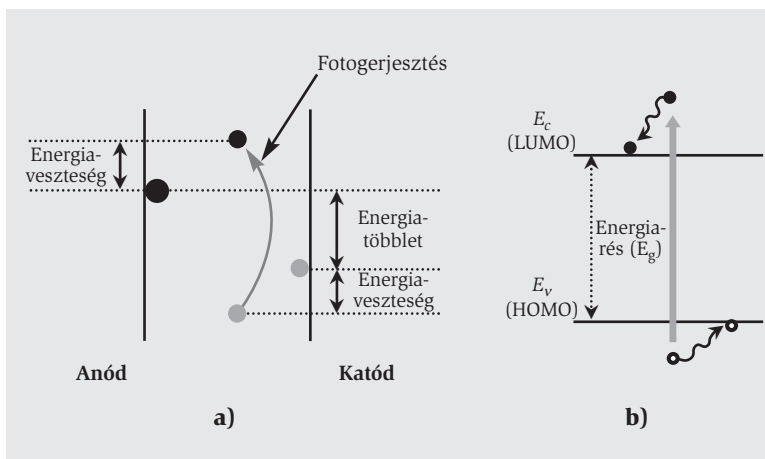
2. ábra. A világ globális energiapotenciálja [2]







3. ábra. Nikola Tesla szerb feltalálózsi és nézete a napenergiáról [15]



4. ábra. Napelem működésének elve

feszítést szentelt a napenergia befogására, továbbítására és tárolására. Erre számos lehetőség kínálkozott, de jelen témánk vonatkozásában a legjelentősebb a *fotovoltaika*<sup>1</sup> (fényelektromos jelenség, hatás), azaz a fény, illetve napenergia közvetlen elektromos energiává alakítása félvezető anyagokból álló napelemek által [5]. Már csak a nyelvújítási kísérlet miatt is érdemes itt megemlíteni, hogy a *fotovoltaika* (FV) eredete több mint két évszázadra nyúlik vissza.

Az effektust 1889-ben *Becquerel* észlelte először elektrolitikus cellák működése közben [6,7]. Ezt számos más próbálkozás követte, de a jelenség hatékonysága nagyon alacsony volt. Gyakorlati megvalósítására az 1950-es években került sor, amikor a *Bell Laboratories* 6%-os hatékonyságú szilícium napelemet állított elő [8], főleg űrbeli alkalmazásra. 1960-ban már 14%-os hatékonyságú napelemet építettek [9], de az rendkívül drágának és kereskedelmileg korlátozottan felhasználhatónak bizonyult. Az árcsökkentés igénye hozta létre a napelemek fentiek utáni második nemzedékét. Ez 1969-ben kezdődött, főleg az árcsökkentés érdekében. Számos félvezető alkalmazását vizsgálták [10–11] és ezek közül az amorf szilícium, a CdTe és Cu(InGa)Se<sub>2</sub> vékonyréteg alapú napelemek bizonyultak a legeredményesebbeknek. A napelemek harmadik generációjának fejlesztését szintén az előállítási költségek csökkentését irányozták elsősorban elő, valamint a hatékonyság mind eredményesebb növelését [13–14]. Ezek részletes ismertetésétől itt el kívánunk tekinteni, de annak bemutatására, hogy milyen változatos alapanyagokkal, technológiákkal folynak napelem-kutatások a világban, és az egyesült államokbeli *National Renewable Energy Laboratory* által összeállított összefoglalásra a különböző alapprogramokról és az ezirányú kutatásokról a továbbiakban még visszatérünk.

A napelemek működésének elve meglehetősen egyszerű. Amikor fény éri az általában félvezető, vagy más anyagot, amiből a napelemet építették, az elektronokat szabadít fel és az anyagban (kristályban) pozitív töltésű lyukakat hagy hátra. Az ilyen elektron-lyuk (exciton) párok képződése jellemző például, mint említettük, a fénynek kitett félvezetőkre. Közeli anyagok (elektródok) aztán befogják a pozitív és negatív töltéseket és elvezetik az elem külső felületére, ahol ezek áramot fejlesztenek (4a. ábra). Még az is megjegyzendő, hogy a napelemeket képző félvezetők egyik jellemzője az energiarés, ami megkülönbözteti ezeket más félvezetőktől.

Az energiarés a leghosszabb hullámhossz, amit egy félvezető elnyelhet (az átlátszó más hullámhosszakra). Egyúttal meghatározza azt az energiamaximumot (többletet), ami rövidebb hullámhosszúságú fotonokból befogható. Az eredmény az, hogy hosszú hullámhosszú fotonok elvesznek és rövid hullámhosszúak hiányosan használódnak fel (4b. ábra).

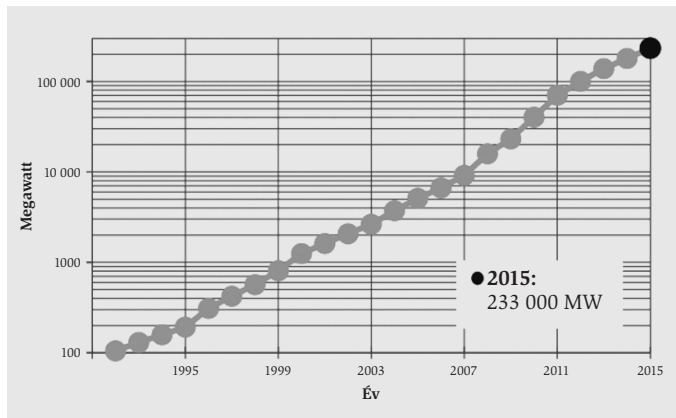
A napelemes napenergia gyakorlati felhasználására rátérve meg kell állapítanunk, hogy a napenergia még napjainkban is csak töredéke bolygónk összes energia-előállításának. Jelenleg a világon napelemekkel és másként összesen körülbelül 30 gigawattnyi napenergiát fejlesztenek, ami körülbelül 0,2%-át jelenti a világ teljes energiatermelésének. Egészen mostanáig, annak ellenére, hogy a napenergia bőséges (1. ábra), a rendszerek, amik a befogását és hasznosítását hivatottak igénybe venni, költségesek és gyakorlatlanok. Ez azonban változóban van és mint e dolgozat címében is utalunk rá, a legújabb kutatási és fejlesztési törekvések, amikről a továbbiakban beszámolni kívánunk, fokozottan lehetőségeket nyújtanak sokat ígérő reményekre.

## Megvalósíthatási napenergia-felhasználási helyzet, Swanson törvénye

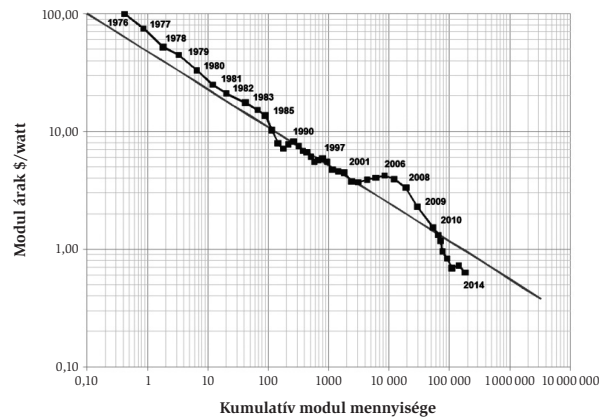
Az utóbbi harminc éven a napenergia-befogás globális kapacitása a fentebb említett korlátozások ellenére jelentős növekedésnek (5. ábra) és az arra szánt költségek látványos csökkenésének is tanúi lehettünk. Manapság már jelen szerző által más tanulmányban ismertetett [16] *Moore törvényéhez* hasonló növekedési folyamat játszódik le a napenergia felhasználásának esetében. Mint azt ott leírtuk, a számítástechnikában *Moore törvénye* szerint az egy chipre építhető tranzisztorok száma az utóbbi ötven

<sup>1</sup> A magyar nyelv ritkán használja a fotovoltaika kifejezést annak ellenére, hogy ezen a néven jelen van például az angol, német, spanyol, cseh, szlovák, orosz, görög nyelvekben.

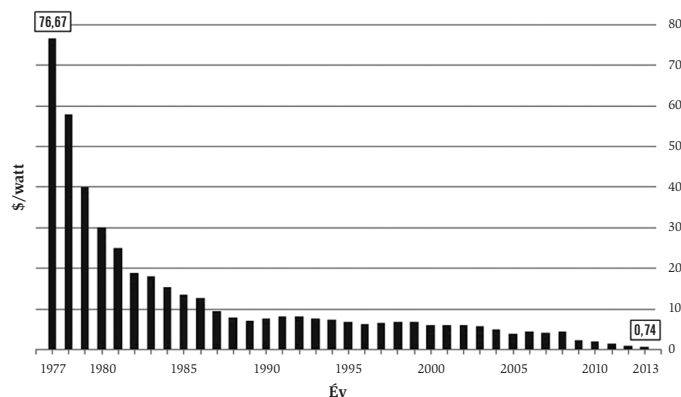
## Napenergia-felhasználási remények



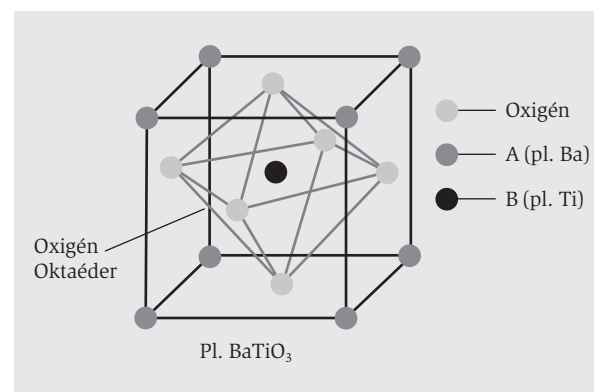
5. ábra. A napenergia-hasznosítás



6. ábra. Swanson törvénye [17]



7. ábra. A szilícium napelemek árának csökkenése [18]



8. ábra. Szervetlen perovszkitkristály szerkezet [19]

év során 18 hónaponként megkétszereződött. Eszerint gyakorlatilag az egy dollárért megvásárolható számítástechnikai teljesítmény durván szólva 18 hónaponként megduplázódott. Ez azt is jelenti, hogy ennek eredményeként például a bármelyikünk zsebében meglévő mobiltelefon számítástechnikai teljesítménye a tízszerese az egykori híres, *Cray1* elnevezésű szuperszámítógépnek és súlya grammokban mérhető annak közel öt tonnájához képest, valamint annak 10-től körülbelül 100 dollárt kitevő ára semmiség a *Cray1* több tízmillió dolláros árához viszonyítva. Amennyiben hasonló dinamika működne a napenergia-hasznosítási technológiában, akkor számíthatnánk egy, a *Moore-törvényhez* hasonló törvényszerűsége? A kérdésre a válasz pozitív és *Richard Swanson* napenergia-szakértőnek, a *Sun-Power* napelem-gyár alapítójának az úgynevezett *Swanson-törvényében* testesül meg (6. ábra) [18], ami azt a megfigyelést tükrözi, hogy jelenleg a napenergia ára minden leszállított kumulatív napenergia-tömeg (modul) kétszereződését 20%-os árcsökkenés követi [17] (6. ábra), és ugyanez az árcsökkenési tendencia vonatkozik például a szilícium napelemek ára is (7. ábra) [18].

## Perovszkitkutatás és magas hőmérsékletű szupravezető perovszkitok

Az 1839-ben *Gustav Rose* német geológus, mineralógus által az *Ural* hegységben felfedezett és általa az orosz *L. A. Perovski* ásványkutató tiszteletére elnevezett perovszkit a bárium-titán-oxid ( $\text{BaTiO}_3$ )  $\text{XII AB}^{2+\text{VI}+}\text{X}^{-2}_3$  ásvány. Az  $\text{ABX}_3$  perovszkit vegyület kristályszerkezetében az A és B nagyon különböző méretű kationok és X egy mindkettőhöz kötődő anion. Az ideális köbös-szimmetriaszerkezetben a 6-szoros koordinációjú B-kationt anion oktaéder veszi körül, míg az A kation 12-szeres oktaédes koordinációjú (8. ábra) [19]. A fenti szerkezetű úgynevezett szervetlen perovszkitok nemcsak a természetben vannak jelen, hanem szintetikusán is előállíthatók és sokféle összetételű vegyület formájában jelenhetnek meg, számos elméleti és gyakorlati tulajdonságot mutathatnak. Ilyenek például az óriási magnetorezisztencia, a ferroelektromosság, a szupravezetés, valamint a magas termokapacitás, stb. [20]. Természetesen nem tárgyunk itt a perovszkitokról és azok alkalmazásának kutatásáról részletesen beszámolni, de említést tennénk jelen szerző egyik előző dolgozatáról a magas hőmérsékletű szupravezető perovszkitokról [21]. Említett dolgozatban, többek között a  $\text{LaBaCuO}$  és az  $\text{YBaCuO}$  perovszkitok  $\text{ABX}_3$  szerkezetű magas hőmérsékletű szupravezetők felfedezésével, illetve kutatásával foglalkoztunk. Az ott ismertetettek kiegészítéseként leírhatjuk, hogy véleményünk szerint természetesen arbiter módon a magas hőmérsékletű szupravezetőkhez kötött perovszkitkutatás múlt század közepétől folyó időszakát és az 1987-ben Nobel-díjjal kitüntetett csúcspériódusát tekinthetjük a *perovszkitkutatás fénykorának, igazi virágzásának*.

## Szerves-szervetlen hibrid szintetikus perovszkitok

A szerves-szervetlen, vagy más néven hibrid perovszkitok felfedezése és kutatása közel százéves múltra tekinthet vissza, nagyjából a múlt század közepétől kezdődően. Ezek a vegyületek a szintetikus kémiának egy olyan csoportját képezik, amelyek a szerves és szervetlen anyagok kívánatos fizikai jellemzőit, tulajdonságait együttesen testesíthetik meg egy új kompozitban. A szervetlen perovszkitok, mint említettük, az elektronikus tulajdonságok széles felhasználási lehetőségeit nyújtják, például szigetelőként, félvezetőként és fémekként, mágneses és dielektromos átmenetekkel, mechanikai keménységgel, hőmérsékletstabilitás kihasználásával. A maguk részéről a hibrid perovszkitokban résztvevő szerves molekulák magas fluoreszcenciás hatékonyságot, plasztikus (rugalmas) mechanikai tulajdonságokat, könnyű és egyszerű feldolgozhatóságot és szerkezeti változtatosságot biztosíthatnak. A hibrid perovszkitok elektronikus szerkezetének a nanométer skálán való modulálása egyedülálló és magasabb rendű elektronikus és optikai lehetőségeket hozhat létre, ami nem jellemző a különálló szerves, vagy szervetlen összetevőkre. Az említett együttes tulajdonságok számos gyakorlati alkalmazásra adtak lehetőséget a hibrid perovszkitok felfedezése óta [22]. Ezekkel az alkalmazásokkal jelen dolgozatban nem kívánunk foglalkozni.

Fontosnak véljük azonban, hogy röviden kitérjünk a hibrid perovszkitok szerkezetére. A **9. ábrán** bemutatott köbös hibrid perovszkitban az A szervetlen kation, mint említettük, egy megfelelő szerves kationnal helyettesíthető. Mivel a szerves kationnak bele kell férnie egy merev és kisméretű 12 közeli szomszéd X atom által képzett üregbe, az A helyre beépíthető szerves molekulák lehetséges száma korlátozott. Úgynevezett tolerancia faktor definiálható azoknak a szerkezeti megszorításoknak a következtében, amiket a perovszkit szerkezet merev gömb modellje kényszerítően létrehoz. Mindez annak érdekében, hogy meghatározható lehessen az A kation mérete a B- és X-ekéhez képest. Egy tökéletes elrendezésű köbös perovszkit szerkezetéhez, azaz ahhoz, hogy az A, B és X ionok összekapcsolódhassanak, a feltétel:

$$(R_A + R_X) = t\sqrt{2}(R_B + R_X),$$

ahol  $R_A$ ,  $R_B$  és  $R_X$  a megfelelő ionsugarak és  $t = 1$ , a toleranciafaktor.

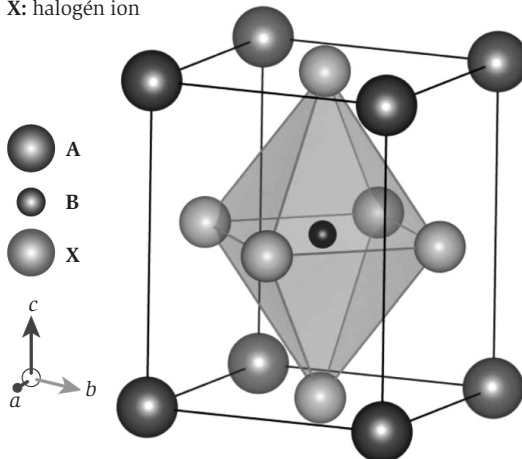
Empirikusan azt találták, hogy  $0,8 \leq 0,9$ ,  $t$ -érték érvényes a köbös perovszkit kristályszerkezetek esetében [25]. Például tekintetbe véve a  $R_B + R_X$  egy lehetséges legnagyobb értékű rendszerét,  $B = \text{Pb}$  és  $X = \text{J}$  ( $R_{\text{Pb}} = 1,19 \text{ \AA}$  és  $R_{\text{I}} = 2,20 \text{ \AA}$  [24])  $t = 1$ -et használva azt eredményezi, hogy az  $R_A$  nem haladhatja meg a  $2,6 \text{ \AA}$  értéket. Adva lévén, hogy a C-C, vagy C-N kötőhosszak körülbelül  $1,4 \text{ \AA}$  értékűek, csak a legkisebb szerves molekulák, azaz a két, vagy három atomból állóak (a hidrogéneket kizárva) férnek bele a fent említett szerkezetbe. Tekintetbe véve ezeket a megfontolásokat, például a metilammonium kation megfelelő választásnak tűnik egy 3D szerves-szervetlen hibrid perovszkit szerkezetben. Ilyen  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{MX}_3$  vegyületeket, köztük  $M = \text{Sn}$  és  $\text{Pb}$ , valamint  $X = \text{Cl}$ ,  $\text{Br}$  és  $\text{J}$  összetevőkkel már a múlt század 80-as éveiben előállítottak és jellemezték (**9. ábra**). Ezek után főleg a múlt század kilencvenes éveiben számos más különféle összetételű hibrid perovszkit vegyület szintetizálására is sor került [27]. Így például a metilammonium kationt a nagyobb méretű formamidinium kationnal helyettesítették az ón(II)-n alapuló  $\text{NH}_2\text{CH}=\text{NH}_2\text{SnJ}_3$  rendszerben, ami szobahőmérsékleten stabil a  $a = 6,816 \text{ \AA}$  rácsállandójú köbös perovszkit szerkezetet eredményezett. Ez körülbelül 1,2%-kal nagyobb a metilammonium analógnál [28].

## A perovszkitkutatás másodvirágzása, hibrid perovszkit napelemek

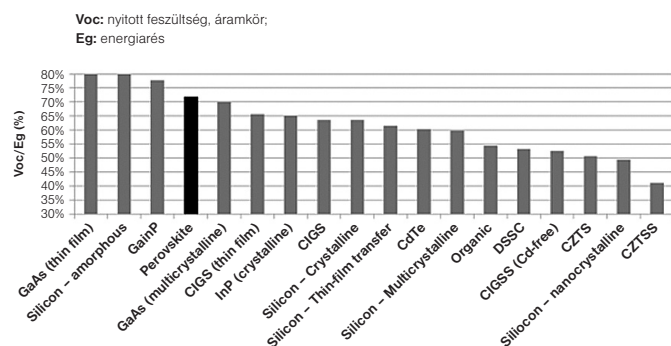
Annak ellenére, hogy a magas hőmérsékletű szupravezetőkre vonatkozó, múlt század közepébéli perovszkitkutatás fénykora utáni perovszkitkutatás is jelentékeny eredményeket tudott felmutatni például maguk a hibrid perovszkitok felfedezésével, mégis úgy véljük, hogy a perovszkitok és a perovszkitkutatás igazi másodvirágzása csak 2009-ben kezdődött. Akkor publikálta ugyanis egy *Tsutomu Miyasaka* által vezetett japán kutatócsoport az „*Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells*” (Fémorganikus halogén perovszkitok, mint látható-fénynt érzékenyítők fotocellákhoz) című közleményt [29]. Ebben elsőként ismertették a  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbJ}_3$  és  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  szervetlen-szerves hibrid perovszkitok (nap)fényérzékelő tulajdonságait. Különlegesen érdekes, hogy a hibrid perovszkitkutatás a felfedezésük és a 21. század eleje közötti időszakban ezen vegyületek számos más elektronikus és optikai tulajdonságát vizsgálta és az eredményeket nagy számú közleményben publikálta, fényérzékelő tulajdonságaik mérésére és bemutatására mégis csak 2009-ben került sor.

Itt még azt is pontosítani kell, hogy eközben számos félvezetővel és más fényérzékeny anyagokkal, különösképpen a szilíciummal kapcsolatos, párhuzamos fotovoltaiikus, fotocella-kutatások nagy intenzitással folytak világszerte. Mint már a bevezetésben is említettük, az egyesült-államokbeli *National Renewable Energy Laboratory* által összeállított, ezeket és a hibrid perovszkitokat is magába foglaló **10. ábrán** látható, a hibrid perovszkitok fotonenergia-hasznosítása már rögtön ezirányú tulajdonságaiknak 2009-ben való felfedezésekor is pozitív összemérhetőséget mutatott az akkor ismert és intenzíven kutatott más anyagok

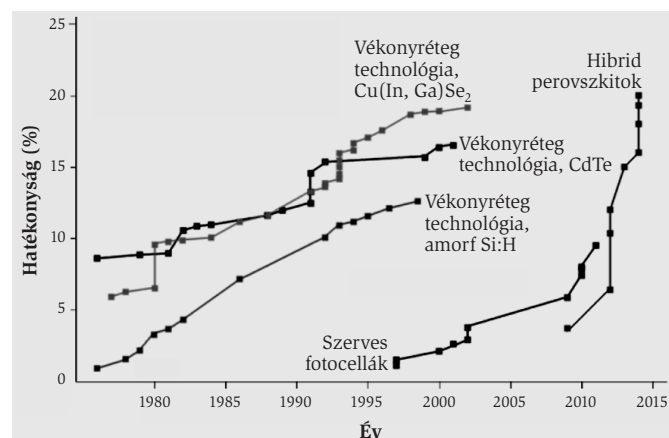
A: Metilammónium ion; B: Ólom, vagy ón ion;  
X: halogén ion



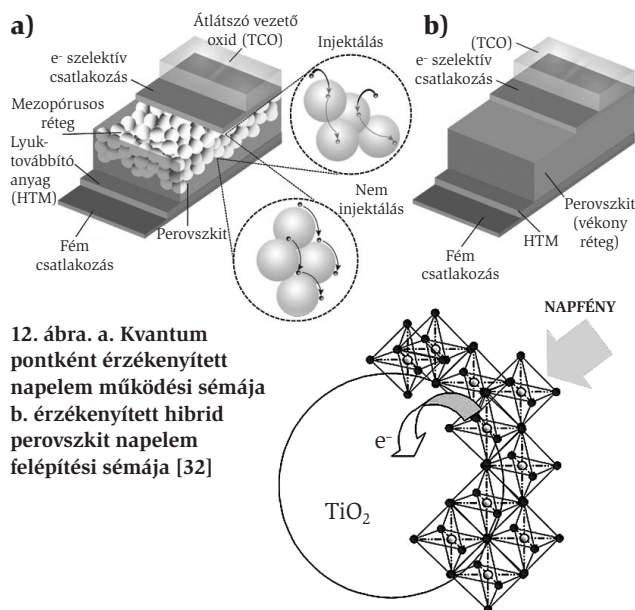
**9. ábra.** Hibrid szerves-szervetlen perovszkitkristály szerkezet [26]



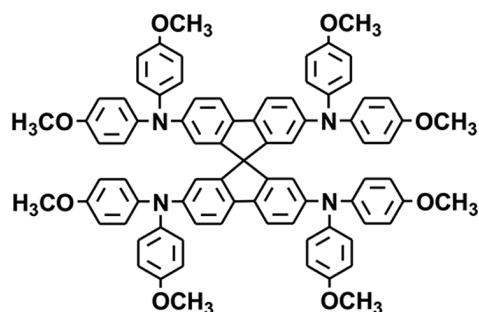
10. ábra. Fotoérzékeny anyagok és vegyületek maximális foton-energia felhasználása [30]



11. ábra. Hibrid szerves-szerveetlen perovszkitok, napelemek energiafelhasználási hatékonyságának időbeli változása [30]



13. ábra. Lyukátvitelre alkalmas 2,2',7,7'-terakis-(N,N-di-p-metoxifenilamin)9,9'-spirobifluorén (spiro-OMeTAD) aromás molekula [34]

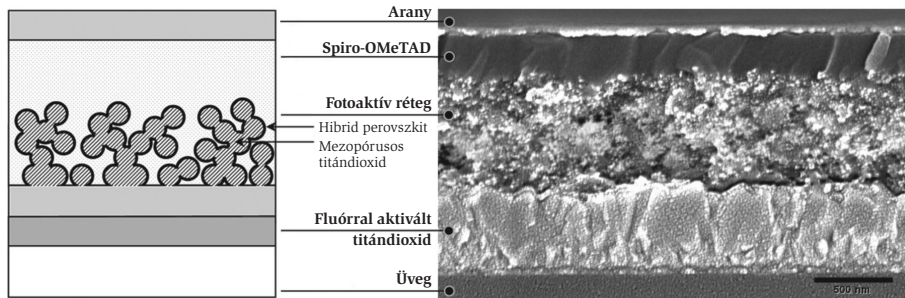


és vegyületek fotoenergia hasznosításával. Véleményünk szerint a japán kutatócsoport felfedezése indította el a perovszkitkutatás másodvirágzását, mint azt a 11. ábra energiahatékonyság 2009 és 2015 közötti égbeszökő (skyrocketing) hatékonyság-növekedése is mutatja az addig vizsgált más anyagok hatékonyságához viszonyítva [30].

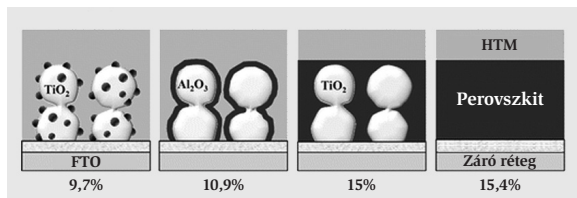
Ehhez azonban vissza kell térnünk a fent említett japán közlemény címében említett, a fémorganikus hibrid perovszkitokra vonatkozó „sensitizer” szóhoz és fogalomhoz, illetve annak magyar fordításához és etimológiai értelmezéséhez. Ugyanis a közleményben a hibrid  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  és  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  perovszkitokat nem önmaguként, hanem folyékony elektrolitként szilárd mezopórusos titán dioxidra „adszorbalva” „kvantum pontokként (quantum dot)” [31] „érzékenyítőként” (sensitizer) használták. Az „érzékenyítő” fogalom mást jelent, mint az „érzékelő”, ugyanis a fotovoltai hatás működésébe a hibrid perovszkit a nem-fényérzékeny titán-dioxid kristályokat is érdekeltté teszi a működésben gyakorlatilag úgy, hogy hibrid perovszkit bevonatot képezve rajtuk a  $\text{TiO}_2$ -t elektron-gyűjtőként (kollektorként) használja. Fényelnyelés után a hibrid perovszkit kvantum-pont kristályokban a fotogenerált elektron injektálódik a mezopórusos  $\text{TiO}_2$ -be. Az egyidejűleg képzett lyuk ezáltal átinjektálódik a p-típusú anyagba (12. ábra) [32].

Jelentős fejlődésnek tekinthetők a Henry Snaith által vezetett kutatócsoport 2012-ben elért eredményei [33] is, ahol mezopórusos  $\text{TiO}_2$ -t és a hosszú nevű 2,2',7,7'-terakis-(N,N-di-p-metoxifenilamin 9,9'-spirobifluorént (rövidítve: OMeTAD) (13. ábra) szintén átlátszó p-típusú félvezetőként (14. ábra) [34] használtak. A továbbfejlesztéshez az is hozzátartozott, hogy néha a mezopórusos n-típusú félvezető titán-dioxidot szigetelő alumínium oxiddal helyettesítették, ami tovább növelte a hatékonyságot, mert ebben a rétegben az elektronátvitel gyorsabb, mint az n-típusú  $\text{TiO}_2$ -ben. A különböző összetételű és felépítésű  $\text{TiO}_2$ -vel és OMeTAD-dal bevont  $\text{TiO}_2$ -vel, valamint  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -mal épített fényelemek szerkezetét és napenergia-hasznosítási százalékát mutatja be a 15. ábra. Mint dolgozatunk címében szerepel, célunk elsősorban a perovszkitkutatás másodvirágzásának a bemutatása és annak bizonyítása. Nem célunk itt a hibrid perovszkitokkal felépített fotocellák fényhasznosításával 2009 óta világszerte folyó rendkívül intenzív kutatások monografikus bemutatása. A 15. ábrán látható energiahasznosítási adatok kiegészítéseként azonban megemlítjük, hogy egyes dél-koreai és egyesült-államokbeli kutatóhelyekről beszámoltak már 17 és 20 százalékhoz közel álló (1. 11. ábra) napfény-hasznosítási adatokról hibrid perovszkit alapú napelemekkel [38, 39].



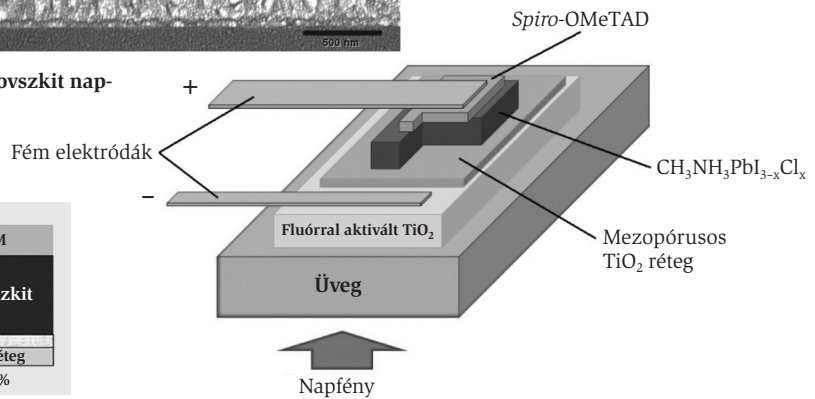


14. ábra. Spiro-OMeTAD-dal érzékenyített hibrid perovszkit nap-elem [33]

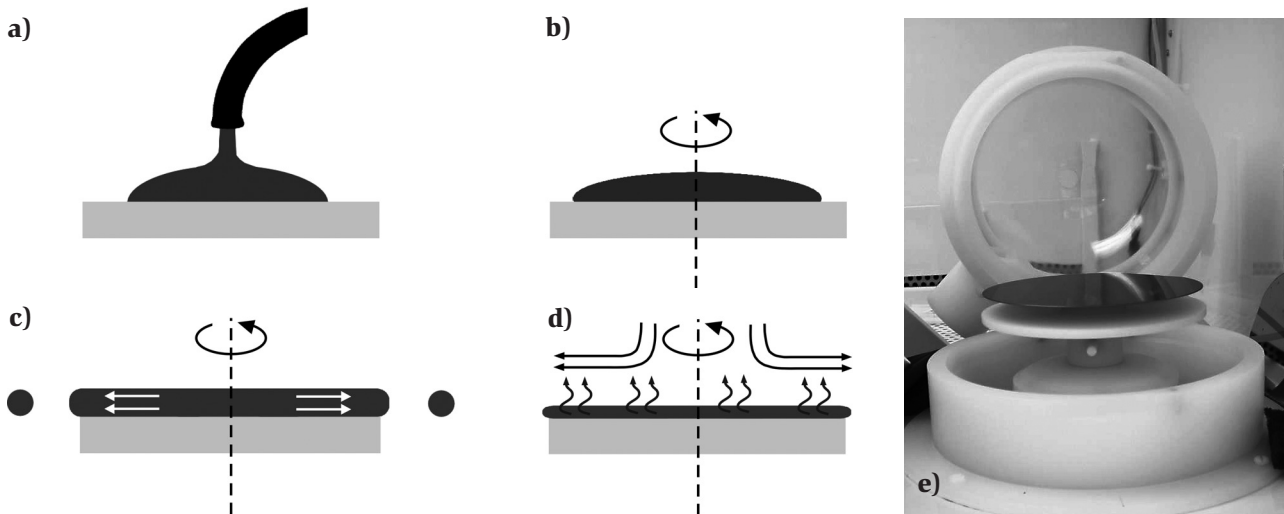


15. ábra. Különböző összetételű hibrid perovszkit fotocellák összetétele és napenergia-hasznosítási százaléka [37]

FTO: fluorine doped titaniumoxide (fluórral dotált titánoxid)  
HTM: hole transport material (lyuktovábbító anyag)



16. ábra. „Spin coating” (pörgetéses bevonás) eljárás [41] a: oldat felvitel (csepegtetés; b, c: centrifugális szétterjesztés d: centrifugális párolgás e: Laurel Technologies WS-400 „spin coating” centrifuga

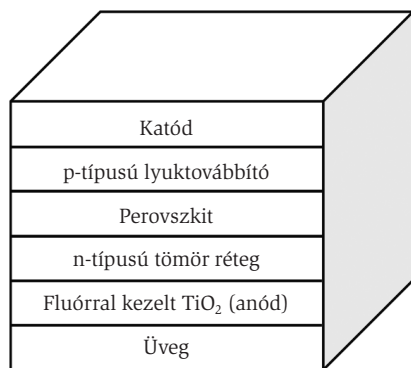
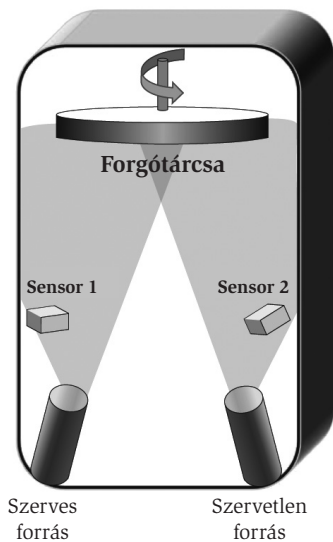


Még egy, jelenleg is folyó kutatási irányzatról érdemes említést tenni. Ugyanis a következő fejezetben említésre kerülő heteroátmenetek (*heterojunctions*) képződéséhez a TiO<sub>2</sub> hibrid perovszkit rétegek homogenitásához hőkezelést (*annealing*) kell alkalmazni (néha 500 °C-ig). Ennek elkerülésére fluórral kezelt TiO<sub>2</sub>-grafén nanokompozitot használnak, lévén, hogy ezek homogenizálására már 150 °C hőmérsékletkezelés is elegendő [40].

## Hibrid perovszkit alapú fotocellák rétegelésének technológiai háttere

Az előzőekben olvashattuk és a 12., 14., és a 15. ábrákon láthattuk, hogy a hibrid perovszkit alapú napelemek felépítésénél különböző morfológiai szerkezetű kristályok, kvantum-pontok és fémek rétegelését, egymáshoz csatlakozását kellett tekintetbe venni, illetve megoldani úgy, hogy a rétegeken, illetve érintkezési felületeken keresztül is zavartalanul lehetséges legyen az elektron-, illetve excitonáramlás. Ennek értelmében az úgynevezett *heteroátmenet* (*heterojunction*) jelenség, azaz két eltérő kristályos, vagy nem kristályos felület közötti határfelület előállításának és összekapcsolásának a megvalósíthatósága, és itt a bemutatása is létfontosságú. A megvalósításhoz főleg két vékonyréteg-előállítási eljárást alkalmaztak. Az egyik az oldatból való úgynevezett „*spin coating*” (pörgetéses bevonás) [40], a másik a vákuumpárolgatás. Az elsőnél általában a bevonó anyag vízben, vagy más oldószerben való oldatát centrifugában pörgő szubsztrátum korong felületének közepére viszik, csepegtetik úgy, hogy a centri-

## Napenergia-felhasználási remények



17. ábra. Kétforrásos vákuumpárológató rendszer és rétegelési (heterojunction) minták [36]

fugális erő az oldatot a korong oldala felé pörgeti, miközben az oldószer elpárolog és a feloldott anyag a korongon vékony réteget képez. A folyamat addig ismétlődő, amíg a kívánt vastagságú réteg kialakul (16. ábra). A pörgetéssel bevonás lehetővé teszi a hibrid perovszkit vékonyrétegek felvitelét különböző szubsztrátumokra (vékonyrétegekre), beleértve üveget, fémeket, kvarcot, műanyagokat, vagy szilíciumot. A megfelelő körülmények, paraméterek beállítására, mint az oldószerfeleség(ek), a hibrid koncentrációja az oldószer(ek)ben, a szubsztrátum hőmérséklete és a pörgetés sebességének ismerete és azok optimalizálása szükséges. Bizonyos esetekben a kialakult vékonyréteg hőkezelését (*annealing*) is igénybe veszik a kristályosság, illetve fázishomogenitás kialakításának érdekében.

A másik eljárás a „*dual-source vapour deposition*”-t (kétforrásos vákuum párológatást) veszi igénybe (17. ábra). Mint az ábrán látható, a két párológató fejű berendezés egyidejű vákuum hőpárológatással, két szabályzó-érzékelő ellenőrzésével párológatja a szerves és szervetlen komponenseket egy centrifugálisan pörgő szubsztrátum korongra [36].

## Utószó

Két kérdés részletezését semmiképp sem szeretnénk elmulasztani, bár nem tartoznak közvetlenül e dolgozat fő témájához, azaz a perovszkitkutatás másodvirágzásához. Mind a két kérdés a hibrid perovszkitok gyakorlati hasznosítására vonatkozik, ezért az itt következőkben együtt is ismertetnénk és tárgyalnánk őket. Az ipari gyártás és napenergia-hasznosítás szempontjából legújabbban a kutatás reményei világszerte az úgynevezett *tandem* napelemekhez fűződnek, azaz olyanokhoz, amikbe egyaránt építettek be hibrid perovszkit és szilícium heteroátmenet (*heterojunction*) fényérzékeny rétegeket. Ezek ugyanis lehetővé teszik majd a teljes fényspektrum eredményesebb konvertálását elektromossággá. Mint említettük a hibrid perovszkitok szintézisének modulálása többféle vegyület előállítását is lehetővé teszi, amik külön-külön a spektrum különböző részeit abszorbálják. A *tandem* legfelső rétege beállítható úgy, hogy erősen nyelje (abszorbálja) a spektrum kék hullámhosszait. Az azalatti szilícium réteg elnyeli a vörös hullámhosszakokat. Az ilyen 20%-os hatékonyságot ígérő *tandem napelemek* ipari előállítását a 2010-ben alapított angliai *Oxford Photovoltaics* cég 2017-re ígéri [42]. Úgy tűnik azonban, hogy itt sem áll meg a fejlődés, mert említett cég, ami az *Oxfordi Egyetem* eredményeinek hasznosítási „*spin-out*”-ja és főleg *Henry Snaith* ottani professzor kutatásaira épül, arra számít, hogy megépíthetők lesznek

olyan *totális-tandem napelemek*, amikben a különböző összetételű rétegek mindegyike a napfény spektrum más-más hullámhossz-részének az összesített befogására, gyűjtésére hangolható.

Azonban a hibrid perovszkitok e dolgozatban vázolt sokat ígérő és a 11. ábrán bemutatott égbeszökő (*skyrocketing*) fejlődésének legnagyobb akadálya, problémája, hátulütője a víz. Ugyanis azok vízben elbomlanak. Ennek megfelelően a hibrid perovszkit alapú napelemeket teljesen vízmentessé kell burkolni. Vigasztalul említhető, hogy a teljesen vízmentes burkolási technológia már rendelkezésre áll. A napelemek szabványosított ellenőrzési tesztjeit, beleértve a vízmentességet, egy *International Electrotechnical Commission* nevű nemzetközi szerv határozza meg [43]. Ennek a szervezetnek a napelemekre vonatkozó ellenőrzési vizsgálatai előírják, hogy azok teljesítményüket fenntartsák több mint 1000 órán át 85 °C hőmérsékleten és 85% nedvességnél is. A cég közleménye szerint az *Oxford Photovoltaics* kísérleti napelemei sikeresen állták az 1000 órás vizsgálati tesztet.

Végül a hibrid perovszkit napelemek és kutatásuk jövőjéről és általános alkalmazási bevezetésükről azok alap kutatási támogatottsága és előállítási technológiája mondja ki az utolsó szót, ami rámutat a feladatra, miszerint: „*smaller, cheaper, faster*” (kisebben, olcsóbban, gyorsabban).

## IRODALOM

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/World\\_energy\\_consumption](https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption)
- [2] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b6/Global\\_energy\\_potential\\_perez\\_2009\\_en.svg/840px-Global\\_energy\\_potential\\_perez\\_2009\\_en.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b6/Global_energy_potential_perez_2009_en.svg/840px-Global_energy_potential_perez_2009_en.svg.png)
- [3] [https://hu.wikipedia.org/wiki/Meg%C3%BAjul%C3%B3\\_energiaforr%C3%A1s](https://hu.wikipedia.org/wiki/Meg%C3%BAjul%C3%B3_energiaforr%C3%A1s)
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Inca\\_Empire#Religion](https://en.wikipedia.org/wiki/Inca_Empire#Religion)
- [5] [https://en.wikipedia.org/?title=Solar\\_cell](https://en.wikipedia.org/?title=Solar_cell)
- [6] A. E. Becquerel, Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires, Comptes Rendus, 1889, 9, 1839.
- [7] R. Williams, Becquerel photovoltaic effect in binary compounds, J. Chem. Phys., (1960) 32, 1505.
- [8] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power, J. Appl. Phys., 1954) 25, 676.

## Napenergia-felhasználási remények

- [9] M. B. Prince, New developments in silicon photovoltaic devices, J. Brit. Inst. Radio Eng., (1958) 18, 583.
- [10] J. J. Loferski, Theoretical Considerations Governing the Choice of the Optimum Semiconductor for Photovoltaic Solar Energy Conversion, J. Appl. Phys., (1965) 27, 777.
- [11] Cyrus Wadia, A. Paul Alivisatos, Daniel M. Kammen, Materials Availability Expands the Opportunity for Large-Scale Photovoltaics Deployment, Environ. Sci. Technol., 2009, 43 (6), 2072.
- [12] F. Alharbia, J. D. Bassb, A. Salhia, A. Alyamani, H.-Ch. Kimb, Robert D. Miller, Abundant non-toxic materials for thin film solar cells: Alternative to conventional materials, Ren. Energy., (2011) 36, 2753.
- [13] M. I. Hossain, F. H. Alharbi, Recent advances in alternative material photovoltaics, Adv. Perf. Mater., (2013) 28, 88.
- [14] A. E. Curtright, M. Granger Morgan, D. W. Keith, Expert Assessments of Future Photovoltaic Technologies, Environ. Sci. Technol., 2008, 42, 9031.
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Growth\\_of\\_photovoltaics](https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics)
- [16] Braun Tibor, Moore törvénye és a DNS-szekvenálás legújabb kori fejlődése, Magy. Kém. Lapja, (2014) 69, 309.
- [17] [https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson's\\_law#/media/File:Swansons-law.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson's_law#/media/File:Swansons-law.png)
- [18] [http://www.apprtrac.net/dailygraph/TheDailyGraph\\_12-12-19.jpg](http://www.apprtrac.net/dailygraph/TheDailyGraph_12-12-19.jpg)
- [19] <http://nptel.ac.in/courses/113104005/lecture4/figures/figure2.jpg>
- [20] L. G. Tejuca, J. L. G. Fierro, Properties and Applications of Perovskite-Type Oxides, M. Dekker, N.Y. 1993.
- [21] Braun Tibor, Félúton a magas hőmérsékletű szupravezetők kutatásában. Vetélkedés, versenyfutás és siker. Magy. Kém. Lapja, (2015) 70, 290.
- [22] D. B. Mitzi, K. Chondroudis, C. R. Kagan, Organic-inorganic electronics, IBM J. Res. Dev., (2001) 45, 29.
- [23] F. S. Galasso, Structure, Properties, and Preparation of Perovskite-type Compounds, Pergamon Press, N.Y., 1969.
- [24] R. D. Shannon, Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides, Acta Crystallogr., Sect A, (1976) 32, 751.
- [25] D. Weber, CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbX<sub>3</sub>, ein Pb(II)-System mit kubischer Perowskitstruktur, Z. Naturforsch., (1978) 33b, 86.
- [26] M. A. Green, A. Ho-Baillie, H. J. Snaith, The emergence of perovskite solar cells, Nature Photonics, (2014) 8, 506.
- [27] D. B. Mitzi, Synthesis, structure, and properties of organic-inorganic perovskites and related materials, Progress in Inorganic Chemistry, vol 48, (2007), K. D. Karlin (Eds.) John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [28] D. B. Mitzi, K. Liang, Synthesis, Resistivity, and Thermal Properties of the Cubic Perovskite NH<sub>2</sub>CH = NH<sub>2</sub>SnI<sub>3</sub> and Related Systems, J. Solid State Chem., (1997) 134, (1997).
- [29] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells, J. Am. Chem., (2009) 131, 6050.
- [30] <http://www.ossila.com/pages/perovskites-and-perovskite-solar-cells-an-introduction>
- [31] [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_dot](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot)
- [32] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702113004562>
- [33] M. M. Lee, J. Teuscher, T. Miyasaka, T. N. Murakami, H. J. Snaith, Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites, Science, (2012) 338, 643.
- [34] <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0823/0287/files/spiro-ometad.png>
- [35] <http://www.sciencemag.org/content/338/6107/643.full>
- [36] M. Liu, M. B. Johnston, H. J. Snaith, Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition, Nature, (2013) 501, 395.
- [37] H.-S. Kim, S. H. Im, N.-G. Park, Organolead Halide Perovskite: New Horizons in Solar Cell Research, J. Phys. Chem., C., (2014) 118, 5615.
- [38] Robert F. Service, Perovskite Solar Cells Keep On Surging, Science, (2014) 344, 458.
- [39] Perovskite fever, Nature Mat., (2014) 13, 837.
- [40] J. T.-W. Wang, J. M. Ball, E. M. Barea, A. Abate, J. A. Alexander-Webber, J. Huang, M. Saliba, I. Mora-Sero, J. Bisquert, H. J. Snaith, R. J. Nicholas, Low-Temperature Processed Electron Collection Layers of Graphene/TiO<sub>2</sub> Nanocomposites in Thin Film Perovskite Solar Cells, Nano Lett., (2014) 14, 724.
- [41] [https://en.wikipedia.org/wiki/Spin\\_coating](https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_coating)
- [42] <http://www.oxfordpv.com/>
- [43] [https://en.wikipedia.org/wiki/International\\_Electrotechnical\\_Commission](https://en.wikipedia.org/wiki/International_Electrotechnical_Commission)

# Kémiai kutatás fogadásból

## Aerogélek és légiesen ultrakönnyű (LUK) aerogél-szerkezetek

### Előszó

A tudományos kutatást vonzóan és sokrétűen feldolgozó könyvben [1] a szerző azt kérdezi, hogy mi hajtja (ösztökéli) a kutatókat. Arra a következtetésre jut, és sok példa alapján meggyőzően bizonyítja, hogy számos esetben a hajtóerő az ambíció és a kíváncsiság.

Jelen dolgozatban az említettek mellett egy olyan egyszerűbb, mondjuk úgy, prózaibb hajtó- és/vagy mozgatóerőt szeretnénk bemutatni, ami szintén iniciálója lehet egy jelentős tudományos, jelen esetben kémiai felfedezésnek. Ez történetesen két tudományos kutató közötti fogadás.

A fentiekhez feltétlenül hozzá kell tenni, hogy az említett fogadásról írásos bizonyíték vagy dokumentáció nem áll fenn, és arról a hírek szóban vagy mások írásaiban, mondhatnánk, legendaszerűen terjedtek. Ami nem vitatható, az a két fél léte és szakmai kapcsolata, és persze maga a felfedezés.

### Gélek

Géleknek tekinthetők olyan, lényegében híg térhálósított szerkezetek, amelyek nyugalmi állapotban nem folyékonyak. Súly szerint a gélek főleg folyadékok, de a folyadékokban jelen lévő háromdimenziós térhálósított hálózat révén szilárd szerkezetekként viselkednek. Így gélek tekinthetők folyadék/szilárd fázisban diszpergált molekulák úgy, hogy a szilárd képezi a folytonos (kontinuus), míg a folyadék a megszakított (diszkontinuus) fázist. Ezt a térhálósított jelenséget a felületi feszültségi erők hozzák létre. A belső hálózati szerkezet következtében fizikai (fizikai gélek) vagy kémiai kötések, esetleg krisztallitok, illetve épen maradós csatlakozások alakulnak ki a körbefoglaló fluidumban. A molekulák közötti intermolekuláris kölcsönhatásokat nézve a gélek szilárdnak látszanak. A valóságban azonban ezek a szerkezetek valahol a szilárd és a folyadék fázisok közöttieknek tekinthetők. Egy járulékos szempont szerint a gélek lehetnek rugalmasak, dehidratálásra szilárdra válnak, és víz hozzáadására újból gélre konvertálhatók melegítés, illetve hűtés hatására. Nem-rugalmas gélekről beszélünk akkor, amikor a dehidratálás utáni szilárd szerkezet nem gélesíthető újra. Az előbbiek jó példája a zselatin vagy a keményítő, az utóbbiak legjobb példája a szilícium-mossav.

### Szilika (szilícium-dioxid) aerogélek

Ezek után visszakanyarodhatunk az előszóban említett fogadáshoz, ami valószínűleg 1931-ben kötött két egyesült államokbeli kutatóvegyész, *Samuel Kistler* és *Charles Learned* között. Az előbbiről annyit tudunk, hogy 1900-ban született, a kaliforniai Cedarville-ben, a Stanford Universityn szerzett BA-fokozatot, majd vegyészmérnökként dolgozott ugyanott. Egy rövid ideig tartó munka után a kaliforniai Stanford Oil Company-nál alkalmazták, 1931-ig kémiát tanított a College of the Pacificben, ahonnan átszereződött az University of Illinois-hoz. 1935-ben kivált az University of Illinois-ból, majd 1940-ben a Monsanto Companyhoz szerződött, 1952-ben dékáni beosztást vállalt az University of Utah-nál. 1975-ben hunyt el.

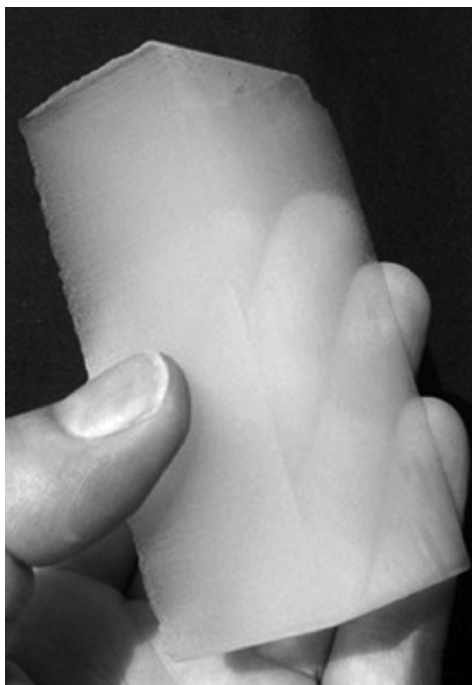
A fogadás másik résztvevőjéről, Charles Learnedről, sajnos, sokkal kevesebb információ áll rendelkezésre. Annyi tudható, de az sem pontosan, hogy kollégák vagy munkatársak voltak 1930-ban vagy a College of the Pacificben, vagy a Stanford Universityn, ahol Kistler 1927-ben, a doktori fokozat megszerzése érdekében kutatásokat végzett [2].

A fogadás tárgya az volt, hogy egy gélből vagy zseléből a víz eltávolítható-e (kivonható-e) összeomlás, illetve zsugorodás nélkül. A fogadást Kistler nyerte meg és eredményeit 1931-ben a *Nature*-ban publikálva [3] a képződött új szerkezetnek az „aerogél” nevet adta. A nyertes jutalma a krónikákból nem derült ki. A *Nature* cikkéből idézzük a következő kivonatot:

„Nyilvánvaló, hogy amennyiben aerogélt kívánunk előállítani, a folyadékot levegővel kell helyettesíteni olyan módon, hogy a folyadék felületét sosem engedjük a gélbe visszatérni. Amennyiben egy folyadékot állandóan a gőz hőmérsékletének megfelelőenél nagyobb nyomáson tartunk, és a hőmérsékletet növeljük, a kritikus hőmérsékleten gázzá alakul át” [4].

A Kistler által tanulmányozott anyagok vizes nátrium-szilikátok savas kondenzálásával előállított szilikagélek (szilícium-dioxid gélek) voltak. Azonban ezen gélekből a víz szuperkritikus fluidummá való konvertálása útján nem tudtak aerogéleket előállítani. Ugyanis a szilícium-dioxid aerogél keletkezése helyett a szuperkritikus víz visszaoldódott a szilícium-dioxidba, ami a víz távoz-





1. ábra. Szilícium-dioxid aerogél [5,6]



2. ábra. Ha Michelangelo Dávid-szobra (1500–1504) aerogélből lenne, körülbelül 2 kg-ot nyomna



3. ábra. Építési (2,5 kg-os) téglát megtartó 0,2 g-nyi aerogél [7]

tával kicsapódott. Közismert volt abban az időben, hogy vizes gélekben a víz a vele elegyíthető szerves folyadékokkal helyettesíthető. Ezt az utat követve Kistler előbb a sók eltávolítása érdekében vízzel alaposan kimosta a szilikagéleket, majd a vizet alkohollal helyettesítette. Az alkoholt szuperkritikus fluidummá változtatva és azt kiszabadítva, sikerült valódi aerogéleket előállítania. Ezek átlátszó, ultrakönnnyű, kis sűrűségű, nagy porozitású szerkezeteknek bizonyultak (1. ábra).

A következő években Kistler különböző mintákból indulva alaposan jellemezte a szilícium-dioxid aerogéleket, majd sok más anyagból (például alumínium-oxid, wolfrám-oxid, vas(III)-oxid, ón(II)-oxid, nikkel, tartarát, cellulóz, cellulóz-nitrát, zselatin, agar, tojásfehérje, gumi) is tudott aerogéleket előállítani [4].

Mint említettük, az aerogélek lényegében száraz, kis sűrűségű, pórusos, szilárd szerkezetű gélmaradványok, amelyekben a pórusok nyitottak, azaz az aerogélekben a gáz nem zárt gömbökben helyezkedik el. A pórusok mérete  $<1$  és  $100$  nm közötti, átlagban  $<20$  nm. Sűrűségük általában  $0,0011$  és  $\sim 0,5$  g/cm<sup>3</sup>. Az aerogélek általában 95–99%-ban levegőből vagy más gázból állnak, sőt, az eddig előállított legkisebb sűrűségű aerogél térfogatának 99,98%-át levegő alkotja. Csak példaként említjük, hogy amennyiben elkészíthető lenne  $0,020$  g/cm<sup>3</sup> sűrűségű aerogélből Michelangelo eredetileg márványból álló Dávid-szobra, annak a súlya csekély két kilogramm lenne (2. ábra).

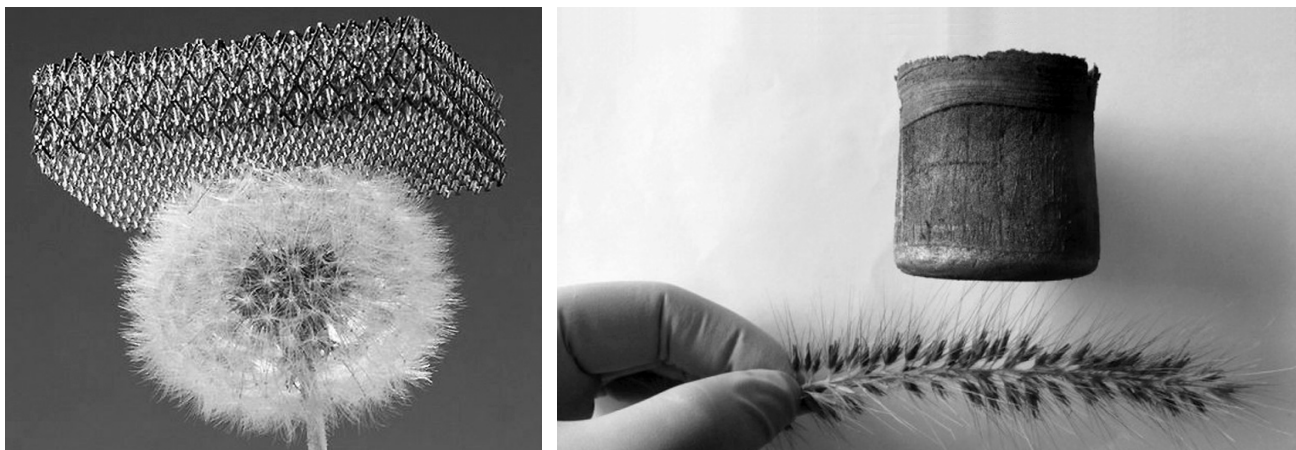
Az aerogél-szerkezetek rendkívül erősek, súlyuknak körülbelül a kétezerszeresét is képesek megtartani (3. ábra). Ez dendritikus mikroszerkezetüknek tulajdonítható, amiben a 2–5 nm méretű, gyűrű alakú részecskék csomókba tömörülnek, nagyon porózus, csaknem fraktális szerkezetet létrehozva. Az aerogélek, főleg a szilícium-oxid összetételűek például rendkívül jó hőszigetelési tulajdonságokkal is rendelkeznek (4. ábra).

Bár, mint említettük, a víz alkohollal való helyettesítésével, majd az alkohol szuperkritikus körülményekben való eliminálásával Kistler megnyerte a fogadást, és feltalálta az aerogéleket, de többlépcsős előállítási eljárása hosszasan és bonyolultnak bizonyult a feltalálás utáni években. Ennek tulajdoníthatóan az aerogélek léte

4. ábra. Bunsen-égő lángja feletti hőszigetelő aerogél lemezre helyezett, nem károsodó virág [8]

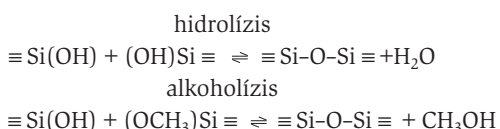


## Aerogélek és légiesen ultrakönnyű (LUK) aerogél-szerkezetek

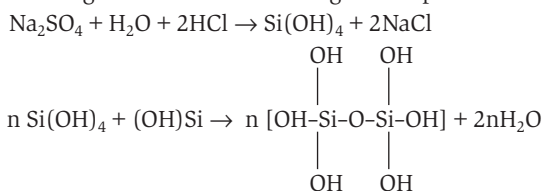


5. ábra. Szénnanocső-grafén LUK aerogélek törékeny növényi „alátéteken” [16,17,18]

csaknem feledésbe merült egészen a múlt század hatvanas éveinek a végéig, amikor a francia *Teichner* és munkatársai újfent kutatni kezdték az aerogéleket [8]. Ennek megkezdéséhez is egy feltételezésszerű legenda kötődik, miszerint Teichner az eredeti előállítás feladatát egy doktoranduszra bízta, és azt kérte, hogy Kistler eredeti eljárásával nagyszámú szilika aerogélmintát állítson elő. Átlátva a feladat bonyolultságát és előrelátható többéves időigényét, a doktorandusz idegösszeroppanással elhagyta Teichner laboratóriumát. A szerencsés fordulat akkor következett be, amikor a doktorandusz (*Nicolaides*) rövid pihenés után visszatérve, főleg azáltal motiválva, hogy a Kistler-eljárás helyett új, gyorsabban célhoz vezető eljárást dolgozzanak ki, ismét munkához látott [9]. Ez az aerogél-tudomány egyik legjelentősebb fejlesztéséhez, a szol-gél kémián keresztüli új aerogélelőállításhoz vezetett. Ebben lényegében a Kistler-eljárásban használt nátrium-szilikátot egy alkoxiszilánnal, azaz tetrametil-ortoszilikáttal ( $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$ , TMOS) alkohollal, vízzel és katalizátorral elegyítették. A keverékben a víz OH-csoportjai helyettesítik az  $\text{OCH}_3$ -csoportokat, és metanol képződik. A keletkezett Si-OH párok vizet és Si-O-Si kötések hoznak létre. Végül az Si-O-Si kötések aggregálódnak, és ezek adják a jellegzetes szilikavázatot. A lépések a hidrolízis, az alkoholízis és a kondenzálás:



Az olcsó nátrium-szilikát valószínűleg mindig a legolcsóbb nyersanyag volt a tiszta szilíciumsav előállítására, amiből szilikagél állítható elő. A nátrium-szilikát vízzel reagálva szilíciumsavvá reagál és az polimerizálva képezi a szilikagélt:



Tehát a TMOS-t metanolos oldatban hidrolizálva egy lépésben gélt, azaz úgynevezett alkogélt kapunk. Ez a Kistler-módszer két hátrányát iktatta ki, bevezette a víz alkohol cserét és kiiktatta a szervesetlen sók jelenlétét a gélben. Ezen alkogélek szuperkritikus alkoholkörülmények közötti szárítása jó minőségű szilika (szilícium-dioxid) alkogélekhez vezetett. A hetvenes években ezzel az eljárással számos fém-oxid aerogélt is állítottak elő [10,11].

A szilika aerogélek ipari gyártása jelenleg számos helyen folyik a világban, és gyakorlati alkalmazásuk is rendkívül kiterjedt [12]. A további fejlesztés jegyében a metanolos oldatokat a szuperkritikus szárítás előtt folyékony szén-dioxiddal helyettesítve is jó minőségű szilika aerogélek állíthatók elő. Ez komoly előnyt jelentett munkavédelmi szempontból, lévén, hogy a  $\text{CO}_2$  kritikus pontja  $31^\circ\text{C}$  hőmérsékleten és 1050 psi (7,2 MP) nyomáson lényegesen biztonságosabb, mint a metanol [ $240^\circ\text{C}$  és 150 psi (1 MP)]. A nyolcvanas években előállításra került az addig legkönnyebb aerogél, aminek sűrűsége  $0,003 \text{ g/cm}^3$ , azaz a levegő sűrűségének alig háromszorosa. Következtek a szerves polimerekből előállított – például rezorcinol-formaldehid és melamin-formaldehid – aerogélek, majd az előbbieket pirolízisével előállítható tiszta szén aerogélek [13].

### Légiesen ultrakönnyű szénnanocső és grafén aerogélek

A következőkre vonatkozóan körbe kell járjunk egy etimológiai kérdést is, ugyanis az angol nyelvű szakirodalomban újabban használatos „ultra-flyweight aerogels” (UFA) kifejezésnek tudtunk szerint nincs magyar nyelvű megfelelője. Ezért javasoljuk a „légiesen ultrakönnyű” (LUK), vagy „légiesen könnyű” fordítást. Erre vonatkozóan jelen szerző nem tudott ellenállni *Margaret*

## Aerogélek és légiesen ultrakönnyű (LUK) aerogél-szerkezetek

Mitchell híres, „Elfújta a szél” című regénye említésének, amelynek ugyan az égvilágon semmi köze az aerogélekhez, de világ-híre, ismertsége folytán valószínűleg kémikusok nemzedékeiben is felidézheti a légiesség képzetét [2].

A szilika és hasonló alapú aerogélek sűrűsége, mint említettük, 10 mg/cm<sup>3</sup> körülről indult, de előállítottak a levegő sűrűségénél (1,2 mg/cm<sup>3</sup>) alig háromszor „nehezebb” aerogéleket is. Az aerogélek kutatása a kétezres évek körül kezdett a még könnyebb, légiesebb szerkezetek felé fordulni azzal a törekvéssel, hogy normális légköri körülmények között például 1 mg/cm<sup>3</sup> sűrűségű aerogélekhez jussanak.

Ez utóbbi megvalósítása nemrég kínai kutatók eredménye, akik óriás grafén-oxid (giant graphene oxide) és vegyes egyfalú (single wall nanotube) és többfalú (multiwall nanotube) nanocső vizes diszperzióját másfél órás keverés után öntőformában két napig fagyasztásos szárításnak (freeze-drying) vetették alá. Az így kapott grafénnanocső habot 24 órán át hidrazingőzzel redukálták, majd újabb 24 órán át 160 °C-on vákuumban szárították. A kínai szerzők [14] ezt a módszert egyszerűsége miatt „sol-cryo” eljárásnak nevezték (5. ábra).

Az így előállított LUK aerogélek porozitása ~99,9%-os, és rendkívül magas, a saját súlyuknál 215–913-szoros olajszorpciós kapacitással rendelkeznek (az olaj sűrűségétől függően). Ezek mellett a LUK aerogélek nagy rugalmasságúak, és jó az elektromos vezetőképességük. Henger, szalag, kocka és pálcza formában is előállíthatók [15–18].

Azt is érdemes még egyszer kiemelni, hogy a LUK aerogélek sűrűsége, mint említettük, a levegőénél, de a héliumánál is alacsonyabb, és csak kétszerese a hidrogénének. Mint az 5. ábrán látható, a LUK aerogél idomokat a törekeny növények könnyen meg tudják tartani. Bár a világon a LUK aerogélek kutatása még a legelején tart, adszorpciós, rugalmassági és elektromos vezetőképességi tulajdonságaik folytán ezeknek nagy ipari alkalmazási jövőt jósolnak.

## Epilógus

Nehezen állítható, hogy a két vegyészkutató, Kistler és Learned közötti fogadás nélkül a tudomány nem jutott volna el az aerogélekhez, illetve azok LUK változataihoz. Az azonban valószínű, hogy a fogadás, amennyiben valóban megtörtént, hozzájárult az események gyorsításához, illetve a kémiai kutatás fejlődéséhez.

### IRODALOM

- [1] Hargittai István, Ambíció és kíváncsiság, avagy mi hajtja a tudományos felfedezőket? Akadémiai Kiadó, Budapest, 2012.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Steven\\_Kistler](http://en.wikipedia.org/wiki/Steven_Kistler)
- [3] S. Kistler, Coherent expanded aerogels and jellies, Nature (1931), 127, 741.
- [4] S. Kistler, Coherent expanded aerogels, J. Phys.Chem. (1932), 36, 52.
- [5] <http://www.onislam.net/english/oimedia/onislaamen/aerog567567e19.jpg>
- [6] [http://www.risolazioni.com/images/photogallery/caratteristiche/aerogel\\_pezzo.png](http://www.risolazioni.com/images/photogallery/caratteristiche/aerogel_pezzo.png)
- [7] <http://stardust.jpl.nasa.gov/images/gallery/aerogelbrick.jpg>
- [8] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Aerogelflower\\_filtered.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Aerogelflower_filtered.jpg)
- [9] G. A. Nicolaidis, S.J. Teichner, New preparation process for silica xerogels and aerogels, and their textural properties, Bull. Soc. Chim. France (1968) 5, 1900.
- [10] <http://www.aerogel.org/?p=822>
- [11] <http://www.aerogel.org/?p=3>
- [12] <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2010/409310/>
- [13] <http://energy.lbl.gov/ecs/aerogels/>
- [14] Margaret Mitchell, Elfújta a szél, [http://hu.wikipedia.org/wiki/Elf%C3%BAjta\\_a\\_sz%C3%A9l](http://hu.wikipedia.org/wiki/Elf%C3%BAjta_a_sz%C3%A9l). Az 1936-ban megjelent regény több mint 30 millió példányban kelt el, és 27 nyelvre fordították le. 1939-ben filmváltozat is készült.
- [15] H. Sun, Z. Xu, Ch. Gao, Multifunctional, Ultra-Flyweight, Synergistically Assembled Carbon Aerogels, Adv. Mat. (2013) 2554.
- [16] <http://69.195.124.107/~ifmefect/wp-content/uploads/2013/08/no-issue-graphene1.jpg>
- [17] [https://www.google.hu/search?q=images+for+aerogels&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=7TrU-LPKOme0QWJhIEo&ved=0CB0QsAQ&biw=1280&bih=880#facrc=\\_&imgdii=\\_&imgrc=Ln9t60kD96L8NM%253A%3B8DmL88FzWe3iVM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.extremetech.com%252Fwp-content%252Fuploads%252F2013%252F04%252Faerogel-grass-spines.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.extremetech.com%252Fextreme%252F153063-graphene-aerogel-is-seven-times-lighter-than-air-can-balance-on-a-blade-of-grass%3B976%3B549](https://www.google.hu/search?q=images+for+aerogels&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=7TrU-LPKOme0QWJhIEo&ved=0CB0QsAQ&biw=1280&bih=880#facrc=_&imgdii=_&imgrc=Ln9t60kD96L8NM%253A%3B8DmL88FzWe3iVM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.extremetech.com%252Fwp-content%252Fuploads%252F2013%252F04%252Faerogel-grass-spines.jpg%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.extremetech.com%252Fextreme%252F153063-graphene-aerogel-is-seven-times-lighter-than-air-can-balance-on-a-blade-of-grass%3B976%3B549)
- [18] [https://www.google.hu/search?q=images+for+aerogels&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=7TrU-LPKOme0QWJhIEo&ved=0CB0QsAQ&biw=1280&bih=880#facrc=\\_&imgdii=\\_&imgrc=vpP1ghqllfLFRM%253A%3BbrLSPVr\\_tzVQRM%3Bhttp%253A%252F%252Fi.dailymail.co.uk](https://www.google.hu/search?q=images+for+aerogels&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=7TrU-LPKOme0QWJhIEo&ved=0CB0QsAQ&biw=1280&bih=880#facrc=_&imgdii=_&imgrc=vpP1ghqllfLFRM%253A%3BbrLSPVr_tzVQRM%3Bhttp%253A%252F%252Fi.dailymail.co.uk)

# A kémiában halhatatlanná vált építész

## Buckminster Fuller és a fullerének

A „fullerén” nevet Kroto és társai [1] nyomán adták egy csupaszén molekulának 1985 után. Az elnevezés alapja e molekula hasonlósága a Richard Buckminster Fuller amerikai építész által javasolt geodéziai kupolákhoz (dómkokhoz).

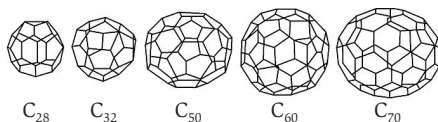
A buckminsterfullerén vagy egyszerűen buckyball nevet Krotóék eredetileg csak a  $C_{60}$  molekulára javasolták [1]. A „fullerének” elnevezést rövidre rá egy egész sor csupaszén kalitkamolekula esetében kezdték használni (1. ábra).

A fullerénekhez vezető út eredetileg Kroto fejében született meg. Őt ugyanis az űrben feltételezett hosszú szénláncok keletkezése és léte érdekelte. Ezek tanulmányozásához és földi körülmények közötti előállításához egy Smalley által épített lézerpárologtatót kívánt használni, amivel ellenőrzött módon különböző szénklasztereket akart létrehozni. Kroto remélte, hogy a grafit lézerpárologtatásával modellezni lehet az űrben lévő hosszú szénláncok keletkezését. A sors úgy akarta, hogy a Krotóék által Smalley amerikai laborjában elvégzett kísérlet egészen más, nem várt és nem remélt eredményekhez [2] vezessen. Ugyanis a lézerpárologtatott grafitminták klasztereinek tömegspektrometriás elemzése nem hosszú láncú szénvegyületeket, hanem egy 60 szénatomból álló klaszter megfelelően stabil és jól látható csúcsát mutatatta ki a tömegspektrumon (2. ábra). Ez volt az első kísérleti utalás a  $C_{60}$  molekula létezésére.

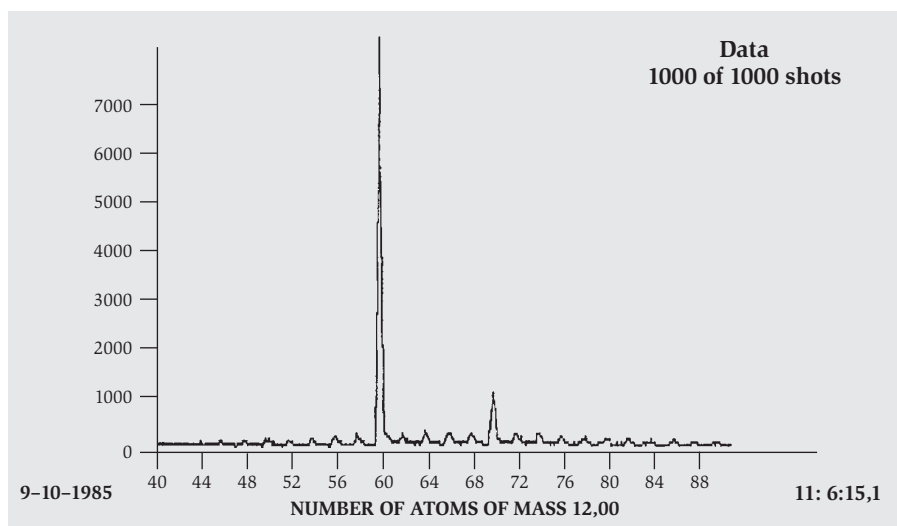
Az ilyen nem várt történések jellemzésére használják a magyar nyelvre lefordíthatatlan „serendipity” angol kifejezést [2]. Ez talán a legegyszerűbben „véletlen felfedezés a tudományban”-ként magyarázható. Az ilyen események előfordulnak a tudományban, de azért tudni kell: ahhoz, hogy a felfedezések felfedezésekké váljanak, a véletlen mellett szükség van a kutatóknak arra a képességére, hogy ott és abban is felfedezzék az újat, az értékeset, ahol és amiben az a legkevésbé várható. Amennyiben Kroto nem érdeklődött volna a mértani idomok iránt, a fullerénsztori egészen más irányt vehetett volna. Ezáltal nagy valószínűséggel e vegyületek egészen más névvel váltak volna ismertté. Ugyanis amikor a 60 szénatomból álló molekula térbeli szerkezete kiderítésének a kérdése felmerült, Kroto képzetében felvillant az 1967-es, a montreali világkiállításon meglátogatott, Buckminster Fuller által tervezett és épített amerikai pavilon geodetikus kupolaszerű szerkezete (3. ábra).

1958-ban Fuller az amerikai Baton Rouge-ban már épített egy geodetikus kupolaépületet (4. ábra). A Baton Rouge-i épület támaszték nélküli kupolacsarnok fesztávja 384 láb, magassága 116 láb volt. Annak idején ez volt a világ legnagyobb fesztávú, támaszték nélküli épülete.

A kupolát nézve úgy tűnik, hogy a kupolaváz csupa hatszögből áll. A valóságban Fuller jól tudta és már Euler, a híres svájci matematikus is kimutatta, hogy egy zárt szerkezetű, kupolaszerű idomot lehetetlen csak hatszögekből felépíteni. Az ilyen szerkezetnek legalább 12 ötszöget is tartalmaznia kell. Ezen építmények alap gondolatát Fuller 1954-ben az Egyesült Államokban szabadalmazta (5. ábra).



1. ábra. A buckminsterfullerén ( $C_{60}$ ) és a fulleréncsalád néhány tagja



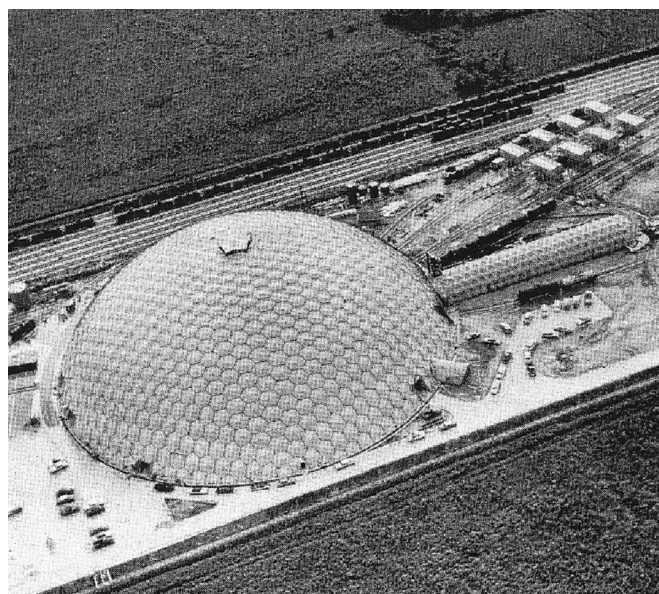
2. ábra. A grafit lézeres párologtatásából keletkezett plazma tömegspektrométeres spektruma



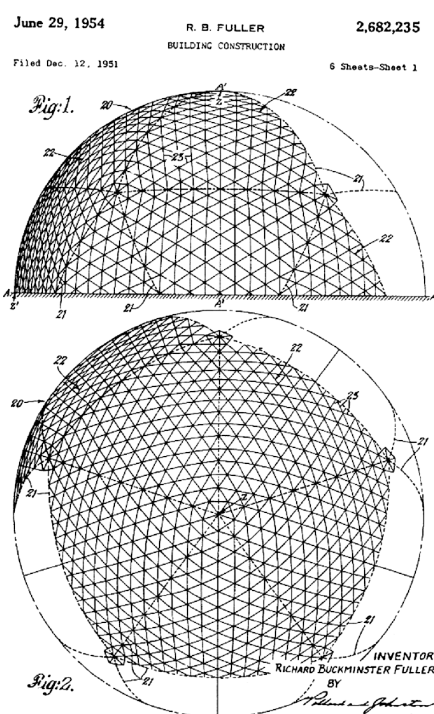


3. ábra. Az 1967-es montreali világkiállításra épített geodetikus dóm formájú amerikai pavilon

*Cédric Thévenet felvétele*



4. ábra. A Union Tank gépkocsi cég geodetikus kupola szerkezetű szerelőcsarnoka (Baton Rouge, USA)



5. ábra. Egy oldal az 1954-es szabadalmi leírásból

A fentebb vázolt építészeti hasonlóságok alapján döntöttek el Kroto és munkatársai [1], hogy új csupaszén molekulájukat Buckminster Fullerről nevezik el. Az ilyenyszerű névadásokat a tudomány eponómiaként tartja számon.

Az eponómia kifejezés a görög *epi* (jelentése -ről, -ről) és *onima* (jelentése: név) szavak összekapcsolásából származik. A tudományban számos híres elmélet, törvény, hatás, elv stb. eponim, vagyis azoknak a kutatóknak a nevét viseli, akik javasolták vagy felfedezték ezeket. Merton [3] meghatározása szerint az eponímia „az a szokás, miszerint a kutató nevét odaillesztjük a felfedezéshez, vagy annak egy részéhez, mint pl. kopernikuszi rendszer, Hook-törvény, Planck-állandó, vagy Halley-üstökös”. Az eponímia számos funkciót szolgál, ráirányítja a figyelmet a jelzett fejlődésre, követendő példaként nevezi meg a tudomány hőseit és motiválja a kutatást az elért eredmény jutalmazásával. Eponimikus elnevezést ritkán adnak vagy hagynak jóvá, hacsak az elnevező (vagy a név elfogadója) térben és/vagy időben nem áll távol a megtisztelni kívánt kutatótól. Ahhoz, hogy ezek a megállapítások igazak legyenek (és igaznak kell lenniük, mert különben az eponímia megszűnne létezni mint fontos tudományos elismerés), a kutatók közösségének fel kell ismernie, mint az Fuller esetében is történt, hogy az érdemen alapszik, nem pedig személyes barátság, nemzeti hovatartozás vagy tudományos iskolák politikai nyomásának hatására jött létre. A közösség elismerése, és így a jövő kutatógeneráció által adott halhatatlanság ígérete az, ami ennek a kitüntetésnek a rendkívüli presztízsét adja.

A Buckminster Fuller nevéből kialakított eponim van annyira rendhagyó, hogy talán nem felesleges megemlíteni néhány, eponimiával kapcsolatos gondolatot, amelyeket nemrég Stigler, a neves amerikai statisztikus-matematikos közölt [3]. Ez szellemen, ellentétes azzal a szabállyal, amely a felfedezéseket a bevezetésben említett módon az azokat megalkotó kutatók nevével kapcsolja össze. Stigler saját gondolatait önironikusán „Stigler eponímia törvényének” nevezte. A törvény legegyszerűbb alakjában így hangzik: „tudományos felfedezést ritkán neveztek el eredeti felfedezőjéről”.

A „törvény” a továbbiakban megállapítja, hogy „egy tudományos felfedezést számos felfedezője közül mindig a legilletékelebbről neveztek el”. Stigler, matematikai statisztikus lévén, törvénye igazolására saját szakterületéről választott példákat.

Állítása szerint: „Laplace leírta a Fourier-transzformációt, még mielőtt azt Fourier közölte volna; Langrange már azelőtt bemutatott transzformálásokat, hogy Laplace tudományos pályafutását megkezdte volna; Poisson a Cauchy-eloszlást 1824-ben publikálta, 29 évvel azelőtt, hogy Cauchy véletlenül felismerte és Bienaymé egy évtizeddel előbb állapította meg és bizonyította be – éspe dig nagyobb általánosságban – a Csebisev-egyenlőtlenséget, mint ahogy Csebisev első munkája megjelent.” Stigler számos más érdekes példát ad „törvénye” igazolására, azonban a dolgok megvilágítása érdekében azt is hozzáteszi, hogy „ritkán fordul elő

<b>1952</b>	Az Amerikai Építészeti Intézet érdemrendje
<b>1954</b>	A Milánói Triennálé nagydíja
<b>1960</b>	Az Amerikai Építészeti Intézet aranyérme
<b>1967</b>	A Bostoni Építészeti Szövetség centenáriumi díja
<b>1968</b>	Az Amerikai Építészeti Intézet <i>Első tervezés</i> díja
<b>1969</b>	Az Egyesült Államok Építészeti és Városfejlesztési Minisztérium érdemrendje
<b>1971</b>	A Wayne Állami Egyetem által jelölt <i>Az év nukleáris hőse</i> kitüntetés
<b>1972</b>	<i>Kiváló előadó és szerző</i> , Anchorage, Alaszka
<b>1973</b>	Philadelphia díszpolgára
<b>1974</b>	A Harvard Business School, New York, elismerési érme
<b>1975</b>	<i>A földkerekség állampolgára díj</i> , Egyesült Nemzetek Békédíj, Világegyesítési mozgalom
<b>1977</b>	<i>Eleanor Roosevelt humanitárius díj</i> , Nagyothallók New York-i Ligája <i>Mérnöki és tudományos díj</i> , Mérnöki és Tudományos Társaságok Föderációja, Drexel Egyetem
	<i>R. Buckminster Fuller Nap</i> , Boston, Massachusetts (1977. február 11.)
<b>1978</b>	<i>R. Buckminster Fuller Napok</i> , Minnesota Állam (1978. április 28-30.)



1. táblázat. A Buckminster Fuller által kapott díjak és megtiszteltetések válogatott listája

6. ábra. Richard Buckminster Fuller harvardi hallgató korában

az, hogy eponmiát olyan valakinek adományoztak, aki semmit sem tett, még érintőlegesen sem, a felfedezés érdekében, és még ritkábban olyanak, aki nem járult volna fontos kutatómunkával az általános tudományos fejlődéshez”.

Az előbbi mondatot Buckminster Fuller esetében különösen hangsúlyozni kell annak ellenére, hogy alapvetően vonatkoztatható rá a humoros „Stigler-törvény”. Buckminster Fullernak ugyanis valóban az égvilágon semmi közvetlen köze nem volt a róla elnevezett felfedezés tárgyához, kémiával, vegyületekkel soha életében nem foglalkozott. Ezzel szemben építészként, feltalálóként, filozófusként szokatlan ötleteivel, építményeivel, világmegváltó gondolkodásával kitűnt embertársai közül. Fuller forradalmian új építészeti stílusa, interdiszciplináris szemlélete karrierje elején bizonyos idegenkedést váltott ki, de ez idővel jelentős elismertségre változott (1. táblázat).

Fuller életrajza, illetve eredete sem érdektelen. Thomas Fuller a brit hadsereg hadnagya volt az első a családban, aki 1638-ban telepedett le Massachusettsben. Richard Fuller 1861. február 13-án született. 1891-ben Richard feleségül vette a chicagói Caroline Wascott Andrewst. Négy évvel később, 1895. július 12-én látta meg a napvilágot Miltonban (Massachusetts) fiuk, Richard Buckminster Fuller jr. Milton akkoriban Boston egyik külvárosa volt. Richard egészen kiskorában már megkapta a „Bucky” becenevet. Milton városkának kitűnő (amerikai) futballcsapata volt, és amint elérte a 18-at, Bucky alacsony termete ellenére bekerült a csapatba. Annak ellenére, hogy egyik lába két centiméterrel rövidebb volt a másiknál, rövidesen csapatának egyik hátvédje lett. 1913-ban kezdte meg mérnöki tanulmányait a Harvardon (6. ábra). Az első világháborúban a tengerészethez került és a George Washington-cirkálón kommunikációs tisztként teljesített szolgálatot. Forradalmi építészeti és filozófiai gondolatait számos előadáson, előadókörúton ismertette.

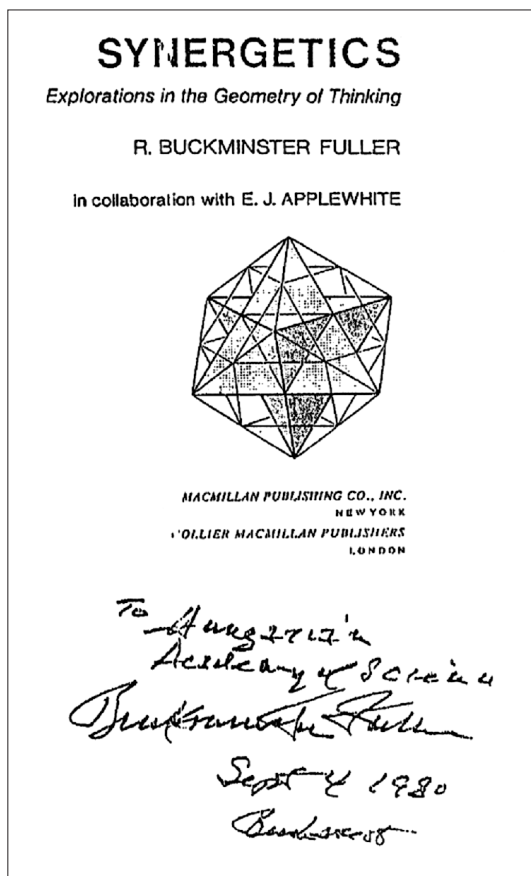
A 60-as évek elején Fuller a Cornell Egyetem építészeti karán ismerte meg Shoji Sodao fiatal japán építész. Aránylag gyorsan barátságot kötöttek, és 1965-től 1967-ig együtt dolgoztak az 1967. évi montreali világkiállítás amerikai pavilonjának tervezésén és felépítésén. Eközben barátokká, sőt üzletársakká váltak és közös vállalkozást hoztak létre (Fuller és Sodao Inc., USA). Fuller 1984-ben a fullerének felfedezése és eponimikus névadása előtt egy évvel hunyt el. A sors e kegyetlen fintora révén nem érhetette meg, nem élvezhette kémiai világhírnevét.

Fuller neve a fulleréneknek köszönhetően tudományos folyóiratcikkek ezrein szerepel, kongresszusokon, középiskolai és egyetemi előadásokon hangzik el világszerte elsősorban a kémia területén, de ez áttérjed a fizikai, anyagtudományi, biológiai, sőt orvosi és gyógyszerészeti szakterületekre is. Mindez azért, mert az eponimikus névválasztás során Krotót és társait a fullerének és a Fuller-féle geodetikus kupolák szerkezeti hasonlóságai befolyásolták.

Elgondolkodtató kérdésként talán az is felvethető, hogy a fullerén eponima kiválasztását, majd világviszonylatú elfogadását és elterjedését a fentiek kiegészítéseként befolyásolta-e egyáltalán, és ha igen, milyen mértékben a név ritka és partikuláris volta. Ugyanis e vegyületek felfedezésekor, mint a tudományban nem szokatlan módon, egyesek alternatív elnevezéseket is javasoltak (pl. „futballene” vagy „soccerene”), és bár ezek hasonlóságai az elnevezendő molekulával is megfelelőnek tűnik, a javaslat után aránylag gyorsan feledésbe merültek, helyet adva a fullerén elnevezés egyeduralmának.

Talán nem érdektelen itt a Buckminster Fuller név kapcsán Bagnall gondolatait tekintetbe venni.

„Számos eponimát tanultam meg, részben az egyetemi vizsgák, részben a magam kedvéért. Boyle-törvény, Charles-törvény, Le Chatelier-elv, Avogadro-hipotézis, Einstein relativitástörvénye, Hess-törvény, csak néhány ezek közül. Ezen tűnődve eszembe jutott, hogy milyen zavaró volna, ha néhány azonos családi nevű kutatónak lenne róla elnevezett törvénye. Nagy-Britanniában például Smith az egyik leggyakoribb név, és én elképzeltem, hogy a tankönyvekben egy egész sereg Smith-törvény jelenik meg.



7. ábra. A Magyar Tudományos Akadémiának dedikált könyv címlapja

Honnan tudnánk akkor, hogy melyik melyik? ... Szerencsére nincs ilyen bőség Smith-törvényekből, és mi szerencsések vagyunk, hogy ennyire változatos lakossági névsor áll rendelkezésünkre ... Nemcsak nincs a tudomány Smith-törvényekkel telehintve, de én a magam részéről egyetlen egyet sem ismerek! Hasonlóképpen nem emlékszem Jones-törvényre, vagy White-törvényre, vagy valamilyen más törvényre, mely a gyakori brit családi nevek egyikével lenne kapcsolatban .... Feltételezve, hogy a tehetség egyenletesen oszlik meg a népesség között, a Smith-törvények eloszlásának egyszerűen a Smithek gyakoriságát kellene tükröznie. Nyissunk ki egy telefonkönyvet és azonnal más kép áll előttünk. Abban kb. 25-ször több Smith található, mint Boyle, így megközelítően 25 Smith-törvénynek kellene lennie az egy Boyle-törvény kompenzálására. De nincs ... Vizsgáljuk meg a Newton nevet. Telefonkönyvem szerint több mint 50 Smith esik minden egyes Newtonra. Hasonlóképpen 25 Smith jut egy Rutherfordra, több mint 400 Smith egy Daltonra, kb. 13 Smith egy Maxwellre, és a Faraday-k és Darwinok száma oly csekély, hogy nem is szerepelnek a telefonkönyvben. Ezzel nem fogalmaztam meg teljességgel a tudományos eponimákra vonatkozó „Bagnall-hipotézist”, de kezdem gyanítani, hogy a kiválóság valószínűsége a családi név gyakoriságával fordított arányban áll ... Hány ember viseli a Mengyelejev nevet Oroszországban? Hány Avogadro él a világban? (A válasz nem  $6,022 \cdot 10^{23}$ .) Dirac neve gyakori a népességben? Bövelkedik a világ van der Waalsok-ban? ... Meg kell vallanom, hogy nem tudom megmagyarázni ezt a jelenséget. Azonban nem tudom elképzelni, hogy az ezen a világon élő Smithek és Jonesok kevésbé tehetségesek lennének, mint bárki más. Vagy talán – és ezt csak mint egy merész feltételezést jegyzem meg – a családi név ritkasága hat kiemelő jelként egy tudományos közlemény olvasása közben, ami ezt nem csak kiválósága miatt teszi emlékezetessé. Vagy talán a ritka családi nevek birtokosai úgy vélik, hogy többet kell tenniük azért, hogy megálljanak a lábukon, nehogy a többiek elsodorják.”

Vajon érvényesek-e a fentiek a Buckminster Fuller névre is?

Élete vége felé, 1980-ban, Buckminster Fuller a Magyar Tudományos Akadémia és a Magyar Építészek Szövetsége vendégeként Budapestre is eljutott. Az Akadémián tett látogatása során egyik könyve dedikált példányát (7. ábra) ajándékozta az Akadémiának.

A könyv szokatlan alcíme talán felvillant valamit Fuller nem konvencionális személyiségéből és gondolkodásmódjából. Befejezésként krimiszerű fordulattal elmondhatjuk, hogy Stigler-törvénye valószínűleg Buckminster Fullerre is érvényes. Ugyanis egy a közelmúltban publikált tény [5] bizonyítani látszik, hogy a Fullernek tulajdonított és általa 1954-ben szabadalmaztatott ún. „geodetikus kupolát” a jénai Zeiss-üzemknél dolgozó Walter Bauersfeld már 1922-ben alkalmazta a jénai planetárium építésénél.

#### IRODALOM

- [1] H. Kroto, J. R. Heath, S. C. O. O'Brian, R. F. Curl, R. E. Smalley, *Nature* (1985) 318, 162.
- [2] R. M. Roberts, *Serendipity. Véletlen felfedezések a tudományban*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2005.
- [3] R. K. Merton, *Priority in Scientific Discovery*, in R. K. Merton (Ed.), *The Sociology of Science*, University of Chicago Press, Chicago, 1973.
- [4] S. M. Stigler, *Stigler's Law of Eponymy*, *Trans. N. Y. Acad. Sci.* (1966) 147.
- [5] R. Taylor, *Lecture Notes on Fullerene Chemistry*, Imperial College Press, London, 1999.



# Akiket szintén esélyesnek tartottak: keserédes kémiai Nobel-díj 1996-ban\*

*Alig titkolt célzással a 2007. évi kémiai Nobel-díjra*

A „jutalomrendszer” egyszerű fogalom, amely általában bizonyos viselkedésformára, illetve mások arra adott válaszára vonatkozik. A társadalmi intézményrendszerek legtöbbje kialakította saját jutalomrendszerét, bár a várható viselkedés és az annak megfelelő válaszok a szóban forgó intézmények természete szerint változhat. Mai tőkés társadalmakban a jutalomrendszer elsősorban „monetáris” alapú, azaz fizetség jár a munkáért, és ez általában arányos a munka során elért teljesítménnyel. Mindez természetesen érvényes a tudományos kutatómunkára is, hiszen a kutatók prózaian szólva „a piacból élnek”. A tudományos kutatás rendszere a fentiek mellett azonban működési mechanizmusa során kialakított egy jellegzetes jutalomformát.

Ennek a „jutalmazásnak” az alapja az az elismerés és megtiszteltetés, amivel a tudományos kutatási közösség a tudományos felfedezések szerzőit honorálja. Az önszervezően kialakult rend szerint a kutatókat kutatási teljesítményükért csakis a szakterületük nemzetközi kutatóközössége jutalmazhatja, hiszen csakis az képes egy bizonyos területen tett felfedezés súlyát értékelni, aki a felfedezővel egyazon területen munkálkodik.

Természetszerűen a fentiek nagyon vázlatosan és leegyszerűsítve taglalták a tudományos jutalmazás fogalomkörét. A kérdésnek bőséges irodalma áll rendelkezésre, érdeklődőknek hivatkozzunk itt a téma egyik alapművére [1].

A tudományos „jutalomrendszer” egyik legismertebb megjelenési formáját a tudományos díjak jelentik. A történelem folyamán a tudományos teljesítményjutalmazására számos díjat hoztak létre és – az esetek többségében „meritokratikusan” – adományoztak olyan kutatóknak, akiket a díjak létrehozói arra alkalmasnak találtak. A körülmények rendkívül szövevényes alakulása következtében azonban egy díj egészen különleges tekintélyre tett szert, a tudományos díjak díjává, minden kutató elérhetetlennek hitt álmává, a tudomány Walhallájába való bejutás küszöbévé, a tudományos teljesítmény örökös elismerésének szimbólumává vált.

Ez a díj az *Alfred Nobel* svéd feltaláló által 1900-ban alapított és 1901-ben kiosztott Nobel-díj, amely külön-külön a fizikában, kémiában, valamint a fízológia és orvostudomány területén elért kimagasló kutatási teljesítményeket honorálja. A Nobel-díjnak, keletkezésének, működésének, eddigi történelmének is jelentős szakirodalma van, érdeklődő igényeek figyelmébe ajánlható *Harriet Zuckerman* kiváló monográfiája [2].

A téma könnyedebb oldalát közelítve talán nem szentségtörés Dévényi Tibor örökérvényű könyvecskéjéből [3] (enyhe változtatással) idézni Az elismerés c. fejezet néhány mondatát:

*A kutató azért kutat, mert ez az életeleme. Elismerést, prémiumot, kitüntetést, díjat sosem vár. Ez távol áll kutatói alkatától. Csak azt reméli, hogy MUNKÁJA eredményét fogják elismerni. Ez pedig egész más dolog! Fontos szempont, hogy a MŰ értékelése a kutató részéről az életkor függvénye:*

Kutató életkora	A MŰVET megillető elismerés <sup>1</sup>
22–25	Különleges Nobel-díj
26–28	Nobel-díj
29–32	Széchenyi-díj I. fokozat
33–35	Széchenyi-díj II. fokozat
36–40	Széchenyi-díj III. fokozat
41–45	TIT emléklakett
46–51	Tiszta Udvar, Rendes Ház díszoklevél
50–70	Dékán visszaköszön
70–	Portás visszaköszön

\*Megjelent: Braun Tibor: Szénszférák zenéje. Fullerénkémiai kalandozások. 2. fejezet, Akadémiai Kiadó, 2000.

<sup>1</sup> Az elismerést váró szemszögéből.



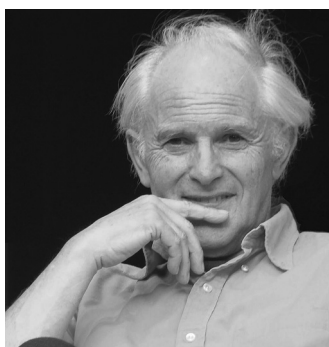
### Akiket szintén esélyesnek tartottak: keserűes kémiai Nobel-díj 1996-ban

1993–1994 körül nemcsak tudományos, hanem médiakörökben is világszerte szóbeszéd tárgyává vált, hogy a fullerének felfedezése – jelentősége váratlan és meglepő jellege, interdiszciplináris vonatkozásai, és nem elhanyagolható módon a fullerének szimmetriája, esztétikai szépsége folytán – jelentős várományosa a kémiai vagy/és a fizikai Nobel-díjnak. Az ilyen suttozásoknak történelmi előzményekre utalva már a közhelyszerű, nem zörög a hasaszt... ismérvek folytán is szokott valóságépítő jellege lenni. Mindezt annak az ismeretében kell említeni, hogy – mint köztudott – a Nobel-díjakat kiosztó stockholmi Nobel Bizottság nem kapkodó, az eseményeket elsiető természetéről híres. Ne feledjük, a fullerének esetében 1996-ban egy aránylag közelmúltbeli – mint az előbbi fejezetben láttuk – 1985-ben és 1990-ben tett felfedezésről volt szó.

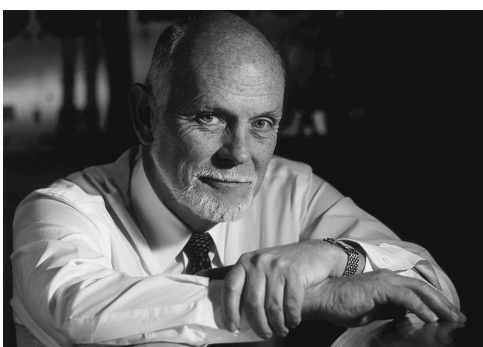
Hadd említsük itt meg azt is, hogy a Nobel-díj odaítélésére vonatkozó meglehetősen szigorú alapszabályok egyike háromra korlátozza azon kutatók számát, akik egyazon felfedezésért Nobel-díjat kaphatnak.

A világ a fullerénkutatás iránt 1993, 1994, sőt 1995 őszén érzékelhetően feszült érdeklődésének ellenére az említett évek Nobel-díjai más jelentős felfedezéseket honoráltak. De az említett évek során *Harold Kroto*, *Richard Smalley*, *Wolfgang Krätschmer* és *Donald Huffman* nevét a Nobel várományosok legjelentősebbjeiként emlegették világszerte.

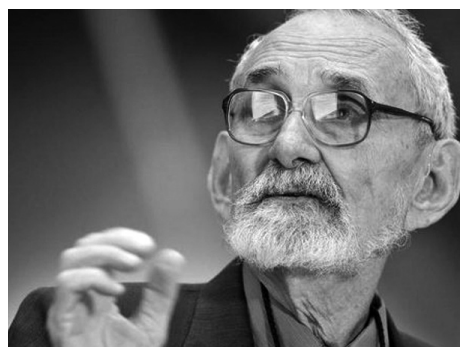
Végül 1996 őszén kigyulladhattak az örömtüzek az erre várók táboraiiban, *Harold Kroto*, *Richard Smalley* és *Robert Curl* megkapták a kémiai Nobel-díjat. Nehéz erről írni, de nem lehet, sőt nem szabad elhallgatni, hogy a nemzetközi meglegedés és öröm hangjait egy már akkor is enyhe, de azóta bizonyos értelemben erősödő meglepetés és kétkedés felhangjai is kísérték.



Harold Kroto



Richard Smalley



Robert Curl

A meglepetés oka egyrészt az 1990-ben tett felfedezés szerzőinek (*Wolfgang Krätschmer* és *Donald Huffman*) kimaradása, másrészt *Robert Curl* megjelenése a díjazottak között. Vitathatatlan, hogy a szakmai közvélemény által világszerte feltételezett négy jelölttel (*Kroto*, *Smalley*, *Krätschmer*, *Huffman*) a három személynek adományozhatóság korlátozó szabálya folytán a Nobel Bizottság nehéz feladat elé került. Ugyancsak kérdésen és vitán felüli az a tény, hogy a fullerének felfedezésében *Robert Curl* is jelentős szerepet játszott. Mindezek ellenére kell az 1996-os kémiai Nobel-díj mellé a keserűes jelzöt illeszteni. Ennek – édes része egyértelmű és nem szorul magyarázatra, a keserűség egy hiányérzetet jelez, amit nemcsak e sorok szerzője érez, ha *Wolfgang Krätschmerre* és *Donald Huffmanra* gondol. Lelkileg, lélektanilag ugyanis sokkal könnyebb önjelölt kutatóként az e fejezet elején *Dévényi Tibor* által olyan találóan kifejezett személytelenségeket elfogadni, sőt humorizálni vele, mint átélni a már-már bizonyosságként kezelt küszöbön való átélés utolsó pillanatbeli be nem teljesedését.

Nehéz ez akkor is, ha tudvalevő, hogy a Nobel-díjak története több hasonló esetet ismer. Sőt a tudományszociológia szakirodalma egy kifejezést is kreált azok jelölésére, aki bár messzemenően méltók lettek volna a Nobel-díjra, azt mégsem kapták meg. Ők a „41. bársonyszék” elfoglalói, szellemes utalással a Francia Akadémia tagságára, ahol közismerten csak a 40-re korlátozott számú „halhatatlan” foglalhatja el a bársonyszékeket. A fulleréntudomány 41. bársonyszékének egyaránt méltó tulajdonosai vitathatatlanul *Wolfgang Krätschmer* és *Donald Huffman*.

A világ nem lenne olyan, amilyen, ha nem javasolt volna „a kibicnek semmi sem drága” alapon megoldást a Nobel Bizottság fullerén-dilemmájára. A valóságban elképzelhető lett volna – mondták egyesek – egy olyan, talán szokatlan, de nem indokolatlan megoldás is, amely 1996-ban *Krotónak*, *Smalleynak* és *Curlnek* ítéli a kémiai és *Krätschmernek* és *Huffmannak* a fizikai Nobel-díjat vagy fordítva. Ennek az utólagos megvalósítása a jövőben sem kizárt.

#### IRODALOM

- [1] Gaston, J.: The Reward System in British and American Science, John Wiley and Sons, New York, 1978
- [2] Zuckerman, H.: Scientific Elite. Nobel Laureates in the United States, The Free Press, New York, 1979
- [3] Dévényi, T.: Dr. Ezésez Géza karrierje, Gondolat, 1978

# A szénnanokémia ékszerei

## Detonációs nanogyémántok

A nanoméreteken túlmenően a detonációs nanogyémántok különleges jellegét a természetes gyémántokhoz hasonló kristályszerkezetük, illetve az abból eredő hibridizált  $sp^3$  jellegű szén-szén kötések által lehetővé tett felületi tulajdonságaik jellemzik.

A detonációs nanogyémántok a kristályos szénkémia családtagjainak (allotrópjainak) – például a fullerének, nanocsövek és grafén [1] – fejlődéséhez viszonyított relatív késésének oka a velük kapcsolatos hisztériás, közelmúltbeli titkosítás túlhajszolása volt az egykori Szovjetunióban [2].

Jelen dolgozat be szeretné mutatni, hogy a téma jellegéből adódó káprázatot, lírát valamelyest elkerülve egy szilárd, kristályos anyag aggregációs állapota a nagyméretű természetes egykristályosból a detonációs nanokristályba való változással milyen különleges, a tudomány szempontjából érdekesen új, vonzó tulajdonságokra tehet szert. Ezáltal valószínűleg jogosan tekinthetjük az 1963-ban viszontagságos módon felfedezett [2], de nyilvánosan csak 1988-ban megismert detonációs nanogyémántokat jelentős hozzájárulásnak a tudományos kutatás nanoméret-tartományához.

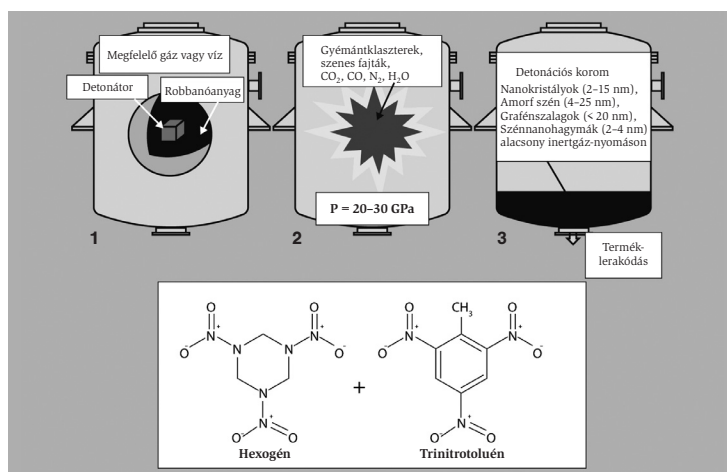
## Detonációs nanogyémántok szintézise [2]

A nanogyémántok szintéziséhez az energiát egy robbanóanyag-keverék detonációja szolgáltatja, és a nanogyémántok magából az oxigénhiányos robbanóanyag széntartalmából alakulnak ki. A nanogyémántokat V. V. Danilenko [3] szovjet kutató fedezte fel véletlenül 1963-ban, amikor grafitból próbált detonációval gyémántot szintetizálni egy amerikai eljárás alapján [4].

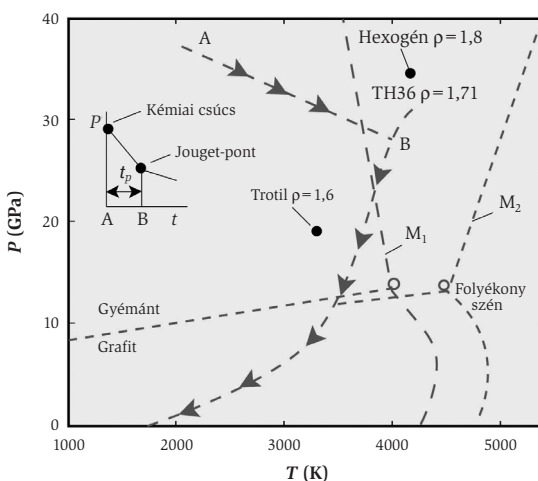
Danilenko kimutatta, hogy az amerikai szerzők állításaival ellentétben a nanogyémántok detonációs szintéziséhez grafitra egyáltalán nincs szükség, ahhoz számos különböző robbanóanyag, illetve robbanóanyag-keverék használható, de mindmáig a TNT (2-metil-1,3,5-trinitrobenzol) és a hexogén 60:40 arányú keverékét alkalmazzák a leggyakrabban. Ezek kizárólag C, N, O és H atomokat tartalmaznak, és negatív az oxigénmérlegük, azaz kevesebb bennük az oxigén, mint az oxigén sztöchiometriás aránya a robbanóanyagban. A negatív oxigénmérleg a gyémántszenkristályok képződésének fontos szükséglete. A robbanás (1. ábra) nyomás alatti gázban ( $N_2$ ,  $CO_2$ , argon vagy más közegben) vagy vízben vagy jégben, száraz, illetve nedves eljárásként mehet végbe. A közeg a rendszer hűtését szolgálja. Annak érdekében, hogy a detonációs hullám által okozott nyomás hatására a robbanóanyagokból képződött nanokristályok gyémánttá alakuljanak, a detonáció során kialakult magas hőmérsékleten a reakciótermékek hűtési sebessége nem lehet 3000 K/percnél kisebb [5].

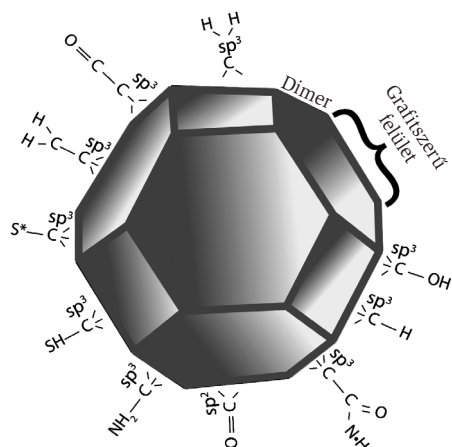
A detonáció által okozott eredeti lökéshullám komprimálja a nagy erejű robbanóanyagot megemelve annak hőmérsékletét, miközben kémiai bomlása óriási energiát bocsátva ki egy mikroszekundum törtrésze alatt alakítja ki a gyémántszenkristályokat.

1. ábra. Széntartalmú robbanóanyagok és a detonációs nanogyémánt-szintézis vázlatos bemutatása [14]

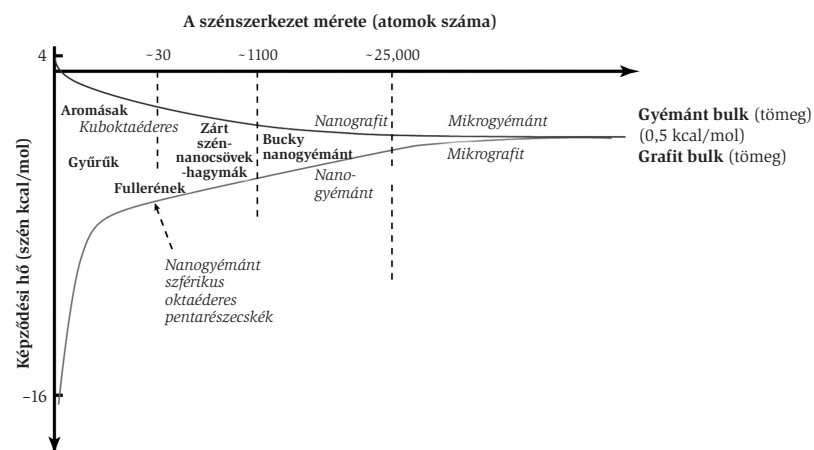


2. ábra. A detonációs nanogyémántképződés fázis-diagramja [4]





3. ábra. Nanogyémántkristály felületén  $sp^3$  szénatom-hibridizáció által megköthető funkciós csoportok



4. ábra. A legstabilabb szénfázis (össz-szén és hidrogénezett) kialakulása a szénszerkezet méretének függvényében [10]

Ahogy a detonációs hullám terjed, az anyagban magas hőmérséklet (3000–4000 K) és magas nyomás (20–30 GPa) keletkezik a gyémánt termodinamikai stabilitásához szükséges módon, ahogy a rendszer fázisdiagramján látható (2. ábra).

A 2. ábrán a betét a detonációs hullám nyomásprofilját mutatja: Az A pont a robbanóanyagok lökéshullámának felel meg (kémi csúcs), a AB pontok a robbanóanyag-molekulák bomlásának és a szabad szén nanogyémántkristályokká alakulásának tulajdoníthatók 20 GPa-nál nagyobb nyomásokon. A B pont a bomlás befejezését (Jouget-pontot),  $t_p$  a bomlás időtartamát jelenti.  $M_1$  és  $M_2$  a szén lehetséges olvadási vonalait, a sűrűséget jelzi. A detonáció során a szabad szénatomok klaszterekké koagulálnak, és diffúzióval növekednek [6–7]. A keletkezett detonációs korom- és gyémántkeverék a detonáció körülményeitől függően körülbelül 40–80% nanogyémántot tartalmaz. A robbanóanyagok összetételének nyújtania kell a nanogyémántok képződéséhez szükséges termodinamikai feltételeket, míg a gázközegnek biztosítania kell a megfelelő hűtési körülményeket (a kedvező hőkapacitással) az oxidálódás megakadályozására.

A hozamot a robbanóedény alakja is meghatározhatja. Az ideális edény (detonációs kamra) gömb vagy félgömb (kupola) alakú, de henger alakú kamrákat is alkalmaznak [2]. A robbanóanyag és az edény tömegének, illetve térfogatának aránya is jelentős, például 5 kg robbanóanyag körülbelül 11 m<sup>3</sup>-es detonációs kamrát igényel és környezeti hőmérsékletű gázt a hűtéshez.

Mint az 1. ábrán látható, a detonációs termékek nanogyémántokon kívül más komponenseket is tartalmaznak, ezért a terméket tisztításnak vetik alá, például salétromsavas termikus oxidálással, nagy nyomáson.

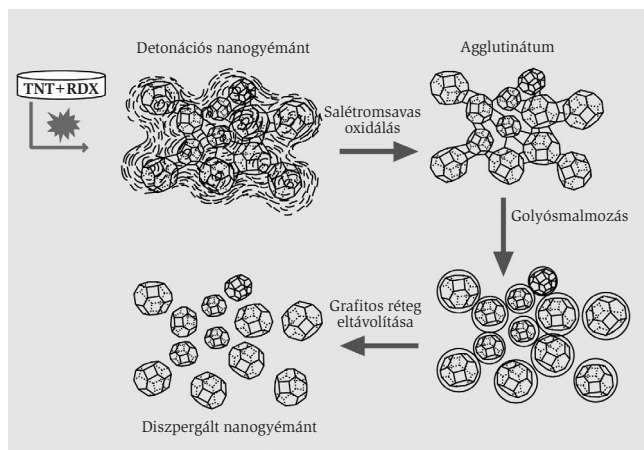
A nanogyémántok tulajdonságait főleg méreteik (4–6 nm) határozzák meg, amelyek nagyjából átmenetet képeznek a makromolekulák (például diamandoidok) és a kristályos szilárd anyagok között. A nanokristályokat képező atomok körülbelül fele, mint már említettük, a felületen helyezkedik el és a felületi szénatomok  $sp^3$  kötéseik, azaz a nanokristály szabad vegyértékkel, angolul „dangling bonds”-okkal (e szópárnak még nincs magyar megfelelője, de mondhatjuk szabad vegyértéknek) rendelkezik. Ennek megfelelően számos funkciós csoportot tudnak kovalens vagy más kötéssel megkötni (3. ábra).

## Detonációs nanogyémántok stabilitása [8–14]

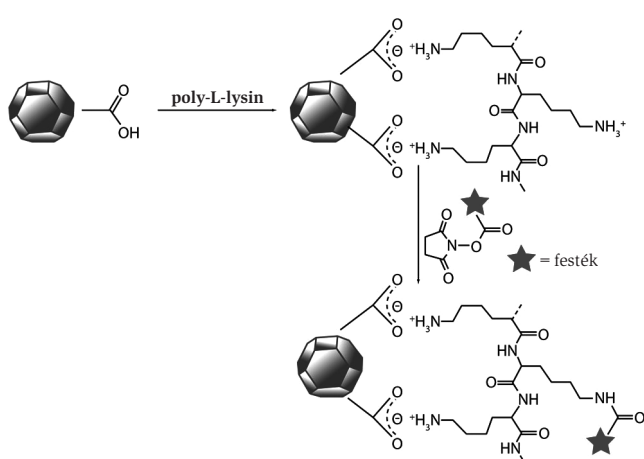
Elméleti és számítástechnikai módszerekkel megvizsgálták a szénnanorészecskék stabilitását és a fázisátalakulásokat a detonációs nanogyémántok és grafitos, valamint fullerénes és más nanoszén között. Feltételezték, hogy a kis nanogyémántok nagyobb aktivitást mutattak oxigénnel való reagálás közben, sőt azok el is égtek a szén oxigénnel való oxidációja következtében. A kritikus méretnél kisebb nanogyémántklaszter instabillá válik, és levegőben gyorsan grafityszerű szerkezetté oxidálódik.

Az összes szénszerkezet méretének növekedésével a nanoskálán a stabilitás a fullerén szénhagymák buckygyémánt ( $C_{60}$ -nal borított nanogyémánt) nanogyémánt-grafit sorrendben változik. Ami a kisméretű szénklasztereket illeti, három stabilitási tartomány vázolható: 12–20 szénatom alatt a legstabilabb geometriák az egydimenziós gyűrűklaszterek, 20 és 28 szénatom között különböző geometriai típusú klasztereknek hasonló az energetikája, nagyobb klaszterek esetében a fullerének a stabilabbak, ahogy a 4. ábrán is látható. Elméleti módszerekkel kimutatták, hogy az összes csupaszén nanoszervezetnél általában a nanogyémántok stabilabbak, mint a grafit, ha a kristálméret 5–10 nm-nél kisebb. Ugyanakkor ezek a módszerek azt is jelzik, hogy a nanogyémánt-stabilitás határa kb. 1,9 nm, ami alatt a fullerényszerű szerkezetek stabilabbak.

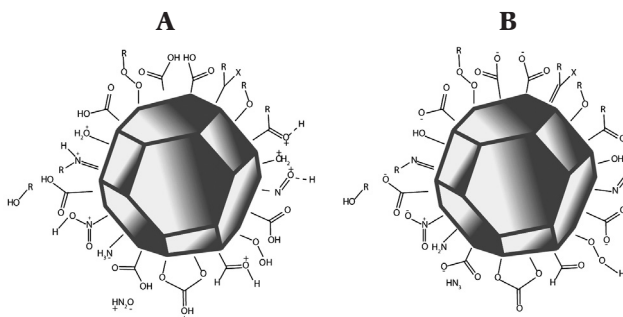
Az 1. ábrán látható detonációs nanogyémántszintézis 3 fázisa szerint képződött nanogyémántpor tisztítását oxidációs atmosférával végezték. A 2002-től alkalmazott eljárás szerint az oxidációs tisztítás 24 órán keresztül szuperkritikus vízzel, 800 °C-on, 200 MPa nyomáson ideális, és egy csaknem színtelen szilárd termék eredményez. A TEM (transzmissziós elektronmikroszkóp) vizsgálatok kimutatták, hogy az eredetileg fekete színt okozó szén- és grafitmaradékok ugyan eltűntek a nanogyémántok felületéről, de IR- és Raman-mérések jelezték, hogy még jelentős mértékben maradtak funkciós csoportok és nagy mennyiségű



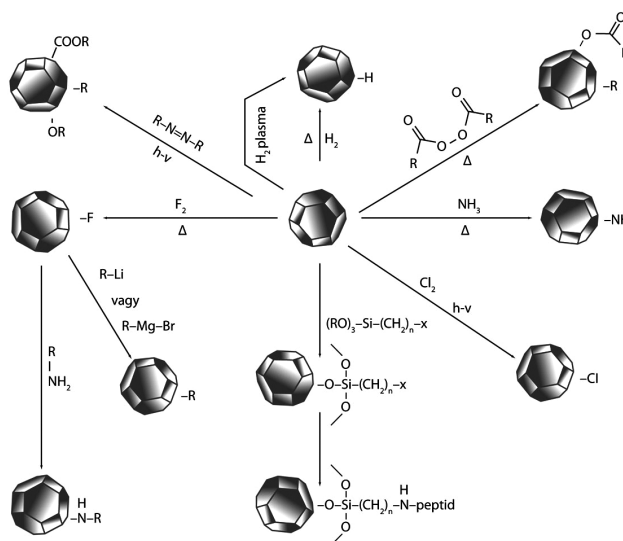
5. ábra. Detonációs nanogyémántok tisztítási és diszpergálási lépései [11]



7. ábra. Adszorpciós peptid-festék kovalens kötés kialakítása nanogyémántok felületén [16]



6. ábra. Nanogyémántok felületének lehetséges kialakulása savas (A), illetve lúgos (B) oldatban



8. ábra. Nanogyémántok felületének sokrétű funkcionálizálása [16]

$sp^3$ -as hibridizált szénatomok a nanogyémántokon. A nanogyémántporokat röviden 200–400 W-os nagy energiájú ultrahangos szonikálásnak, majd 100 W-os vizes ultrahangos mosásnak is alávetették. Az ezután elvégzett DLS- (dynamic light scattering) mérések kimutatták, hogy a nanogyémántkristályok három csúcs szerint 30–50 nm, 3–5 nm és 0,2–0,4 nm tartományban jelentkeztek. Feltételezték, hogy ezek a csúcsok primer és szekunder aggregátumoknak felelnek meg. Az aggregátumok könnyen darabolódtak achátmozsarazással vagy golyósmalmozással (5. ábra).

A legnagyobb agglomerátumokat összetartó erők valószínűleg gyenge van der Waals-jellegűek. Ezek a szekunder aggregátumok, mint említettük, könnyen megszüntethetők ultrahangkezeléssel és golyósmalmozással. A primer agglutinált részecskéket valószínűleg nemcsak van der Waals-erők tartják össze, hanem nagy tömegű C–C kovalens kötések is. Ezeket csak nagyon erőteljes golyósmalmozással lehet megszüntetni.

A tisztítási és diszpergálási vizsgálatokból kis szögű röntgensugár-szóródási kísérletekből aránylag egyértelműen  $4,5 \pm 0,5$  nm-ben állapították meg a nanogyémántok átlagos méretét.

## Detonációs nanogyémántok funkcionálizálása

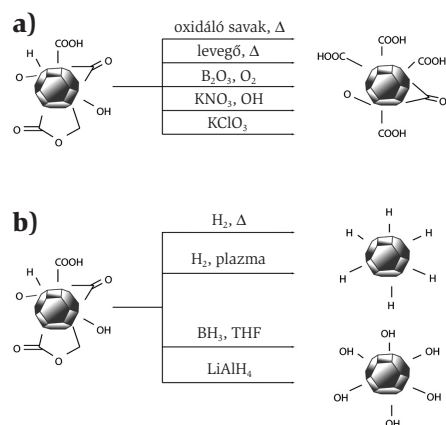
A detonációs nanogyémántok kémiája rendkívül aktív és eredményes kutatási területté vált az utóbbi tíz év során. Hiú próbálkozás lenne itt az egész területet átfogóan ismertetni. Ezért a továbbiakban a szerző által néhány jellemzőnek tartott példán mutatjuk be az érdekesebb eredményeket.

A detonációs folyamat közbeni extrém környezet révén a nanogyémántok felületén funkciós csoportok, karbonsavak, észterek, éterek, laktonok, aminok stb. nagy változata jön létre, és ezek különböző savas vagy lúgos közegekben továbbalakíthatók (6. ábra) [15–16].

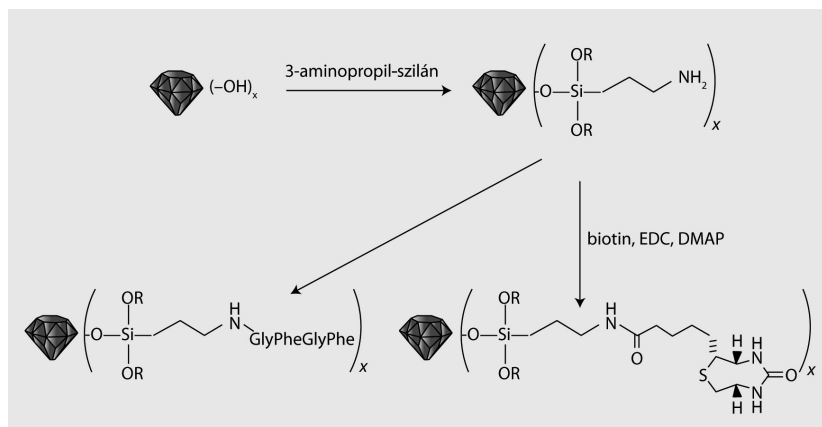
A felületszerkezetek tanulmányozására számos műszeres analitikai módszert, például fotoelektron-spektroszkópiát [17], infravörös spektroszkópiát [18], NMR-spektroszkópiát [19] vettek igénybe. A nanogyémántok felületére szorbaált víz különlegesen érdekes elektronfelületeket hozhat létre. Ezeket „surface bond bending”-ként (felületi sávgörbület) jellemezték [20].



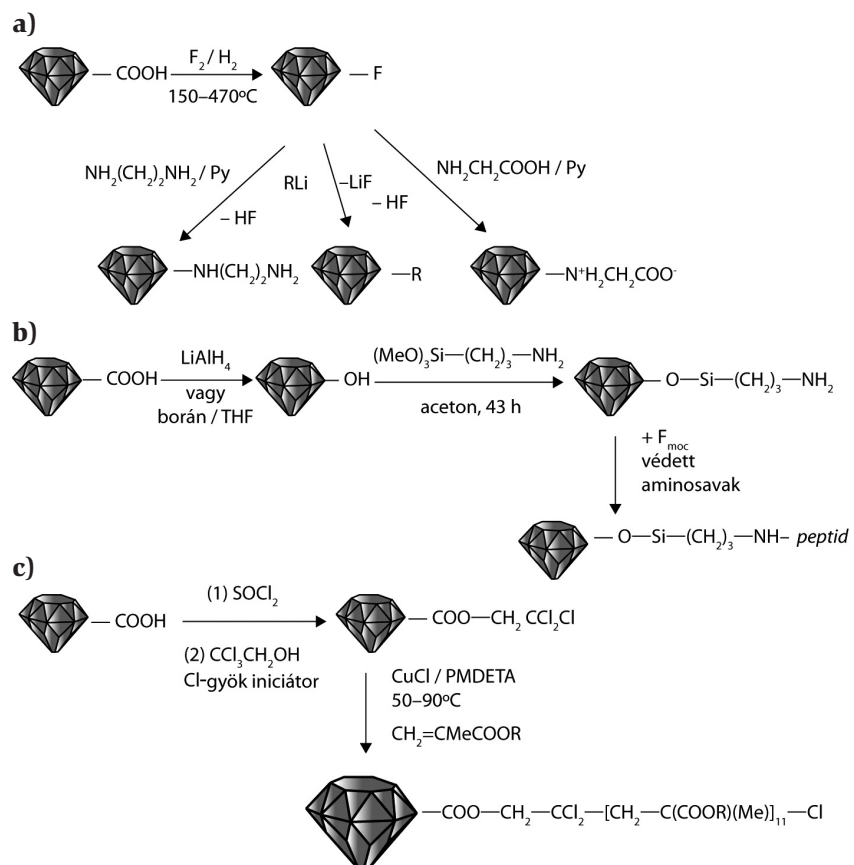
## A szénnanokémia ékszerei



9. ábra. Detonációból kikerült nanogyémántok tisztítása oxidációs (a), illetve redukciós (b) kezeléssel [22]



10. ábra. Nanogyémántok kovalens funkcionizálásának lehetőségei szilánokkal, illetve aminos csoportjaik további módosításával. A biotinizálás és rövid peptid építése modellként szolgál komplexebb felületek bioaktív vegyületekkel való funkcionizálására [16]



11. ábra. Karboxilált nanogyémántok funkcionizálási lehetőségei [24]

Nagyméretű szerves molekulák és/vagy fehérjék is köthetők a nanogyémántok felületéhez. A kötés erejét a felület eredeti szerkezete határozza meg. Például az adszorbált poli-L-lizin szabad aminos csoportjai a fluoreszcens festékek kovalens rögzítését szolgálták a nanogyémántokra előzőleg szorbált fehérjeréteghez (7. ábra). Ezeket a kristályokat jelzett vegyületeként használták biológiai kompatibilitási vizsgálatoknál [21]. Nagyon hasznos, további funkcionizálásra alkalmas felületek alakíthatók ki nanogyémántokon reaktív gázokkal, szilárdgáz reakciókkal, proxidálással, szililálással stb. (8. ábra).

Kezelhetők a detonációból tisztítási folyamatból kikerült nanogyémántfelületek különböző oxidációs vagy redukciós módszerekkel is oldat- vagy gázfázisban egyaránt (9. ábra).

A felületi karbonilcsoportok borános redukációjából hidroxilezett nanogyémántok keletkeznek. Ezek trialkoziszilánokkal aránylag egyszerűen funkcionizálhatók. A szilánok utána például peptidet vagy biotint köthetnek meg (10. ábra).

Hidrofób oldószerekben könnyen diszpergálható, hidrofób, kéken fluoreszkáló nanogyémántok szintetizálhatók koloidális oldatot képezve oktadecilamin kovalens megkötésével. Ez az anyag például olyan alkalmazásoknál használható, ahol fűtőanya-

## A szénnanokémia ékszerei

gokban, polimerekben vagy olajokban stabil diszperziókra van szükség. De a nanogyémánt-oktadecilamin vegyület benzolban, toluolban, kloroformban és diklórmétánban is jól diszpergálódik.

Mint említettük, a detonáció utáni tisztítás ellenére maradhatnak a nanogyémántok felületén fekete színű,  $sp^2$  kötésű, grafén-szerű szénmaradványok. Ezek eltávolítására levegőben, 400–430 °C-ra való felmelegítés bizonyult a legcélravezetőbbnek aránylag szerény nanogyémántveszteség mellett. A terméket erősen oxidált, de főleg  $sp^3$  szénkötések jellemzik, amelyeket hidrogénezni lehet a felületi oxigén eltávolítására, ami aztán kívánság szerint változtatható, például karboxilezhető (**11. ábra**). Mint ott látható, **(a)** fluorozható és azon keresztül akril-, aminosav vagy aminosav végű nanogyémántok képezhetők. De a COOH-csoportok hidroxilokká redukálhatók, amik szililálással peptid nanogyémántok előállításához alkalmas aminocsoportokon keresztül tovább funkcionálizálhatók **(b)**. Ugyancsak lehetséges a nanogyémántok felületén metakrilát-alapú polimer végződés kialakítása atomtranszfer gyökös polimerizáció igénybevételével, ahol  $R = j\text{-Bu}$  **(c)**.

Az itt bemutatott funkcionálizált nanogyémántok rendkívül sokrétű alkalmazásra leltek a nanotechnológiában és sok más területen. A legígéretesebbnek a biológiában, valamint a nano-orvosbiológiában elért és várható eredmények tűnnek [25].

### IRODALOM

- [1] Braun T., A kristályos szén-nanotudomány legújabbkori diadala. Interdiszciplináris fullerén-, nanocső- és grafén eszkaláció, Magy. Kém. Lapja, (2012) 67, 84.
- [2] Braun T., Magy. Tudomány (2011) 172, 124.
- [3] V. V. Danilenko, Synthesis and Sintering of Diamonds by Explosion, Energoatomizdat, Moscow, 2003.
- [4] P. J. De Carli, A. C. Jamieson, Science (1961) 113, 3467.
- [5] A. L. Vereshchagin, Detonation Nanodiamonds, Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, (orosz nyelvű), 2001.
- [6] J. A. Vicelli, F. H. J. Ree, Appl. Phys. (2000) 88, 683.
- [7] J. A. Vicelli, J. Chem. Phys. (2001) 115, 2730.
- [8] N. Paric, K. Lee, S. V. Han, J. J. Yu, J. Ihm, Phys. Rev. B. (2002) 65, 121, 405.
- [9] D. Tomanek, M. A. Schluter, Phys. Rev. Lett. (1991) 67, 2331.
- [10] O. Shenderova, G. McGuire, in Nanomaterials (Gogotski, Y. Ed.), chpt. 7, p. 176, Taylor&Francis, New York, 2006.
- [11] E. Osawa, Pure Appl. Chem. (2008) 80, 1365.
- [12] A. E. Alekszenszki, M. V. Bajdakova, A. Ya Vul, V. I. Siklitski, Phys. Solid State (1988) 41, 668.
- [13] M. V. Korobov, N. V. Avramenko, A. G. Bogachev, N. V. Rozhkova, E. Ozawa, Adv. Mater. (2007) 19, 1201.
- [14] A. M. Schrand, S. C. Hens, O. A. Senderova, Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. (2002) 34, 18.
- [15] A. Kruger, Adv. Mater. (2008) 20, 2445.
- [16] A. Kruger, Chem. Eur. J. (2008) 14, 1382.
- [17] P. I. Belobrov, L. A. Bursil, K. I. Maslakov, A. P. Dementjev, (2008) Appl. Surf. Sci. 215, 169.
- [18] T. Xiang, K. Xu, Carbon (1995) 33, 1663.
- [19] N. Komatsu, N. Kadota, T. Kimura, E. Osawa, Chem. Lett. (2007) 36, 398.
- [20] S. Ji, T. Jiang, K. Xu, S. Li, Appl. Surf. Sci. (1998) 133, 231.
- [21] P. Chen, S.F. Huang, Carbon (2003) 41, 2093.
- [22] A. Krueger, J. Mater. Chem. (2003) 18, 1485.
- [23] V. N. Mochalin, Y. Gogotsi, J. Am. Chem. Soc. (2008) 131, 4594.
- [24] K. B. Holt, <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1861/2845.full>
- [25] D. Ho (Ed.), Nanodiamonds. Applications in Biology and Nanoscale Medicine, Springer, New York, 2010.

# A kristályos szénnanokémia matrjoskababái

## A szénnanohagymák kémiája

A kristályos szén új allotrópjainak, a fulleréneknek a felfedezése 1985-ben [1] onnan indult, hogy a felfedezők eredetileg a csillagközi terekben lévő, hosszú láncú szénvegyületek létét szerették volna bizonyítani. A csillagközi terekben uralkodó körülményeket reprodukáló laboratóriumi vizsgálataik során akadtak rá véletlenül egy új szén molekulacsoportra, amelynek első tagját, a  $C_{60}$ -at Buckminster Fuller amerikai építész tiszteletére buckminsterfullerénnek nevezték el.

Az akkor még virtuális molekulának 1990-ig kellett várniuk arra, hogy német és amerikai kutatók – szintén véletlenül – a valóságban is elő tudják őket állítani [2]. A véletlenek sorát 1991-ben a szénnanocsövek felfedezése gyarapította [3].

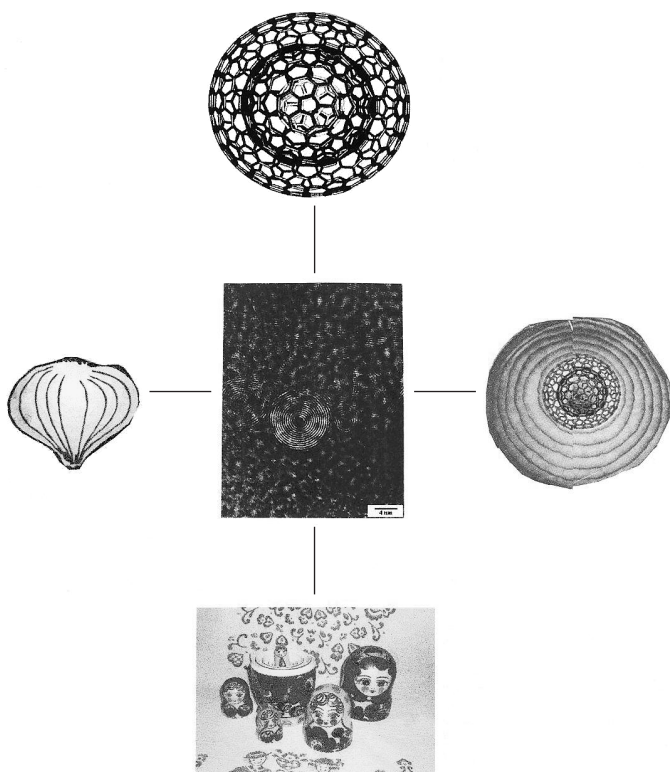
A fentiek után már valószínűleg nem tűnik meglepőnek, hogy az e dolgozat tárgyát képező szénnanohagymákat is véletlenül fedezte fel Ugarte brazil kutató [4] 1992-ben. Daniel Ugarte a Lausanne-i Szövetségi Műszaki Egyetemen (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) elektronmikroszkóppal vizsgált arannyal és lantán-oxiddal töltött szénnanorészecskéket, elektronbesugárzásuk után. A besugárzás az arany elpárolgását eredményezte, egyúttal a nanorészecskék lapkás szerkezetét matrjoskababaszerűen, illetve hagymaszerűen egymásba foglalt széngömbökké alakította.

A szénnanohagyma hagymaszerűen vagy matrjoskababaszerűen egymásba foglalt, különböző méretű széngömbökből áll, ahogy az **1. ábrán**, Ugarte elektronmikroszkópos felvételén, illetve a **2. ábrán** grafikai analóggént látható. A szén hagymahéjak száma az előállítástól függően különböző lehet, a leggyakrabban 2–6 között váltakozik. Ezért a jól kristályosodott nanohagymák legbelső gömbjének (héja) átmérője kb. 0,7–0,8 nm, ami megegyezik a  $C_{60}$  átmérőjével. Tekinthejük a nanohagymákat fullerénnel töltött endohedrális fulleréneknek is, amit például két belső rétegű  $C_{340} \cong C_{240} \cong C_{60}$  molekulaként jellemezhetünk, illetve írhatunk le.

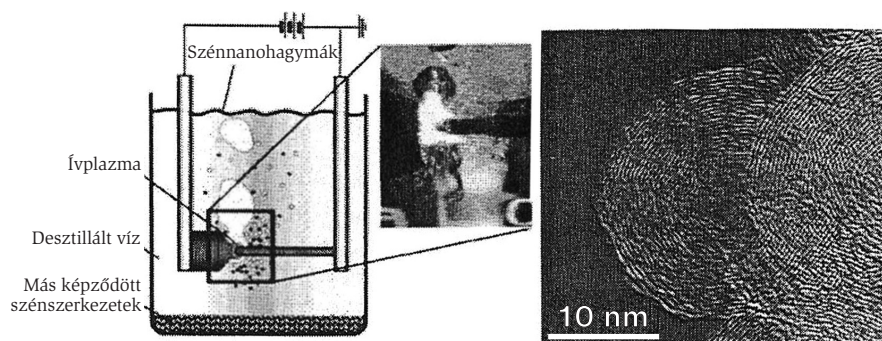
A nanohagyma héjai tökéletes gömbökként alakulnak ki, és a héjak közötti 0,334 nm-nyi távolság megegyezik két (220) grafitlapsík közötti távolsággal.



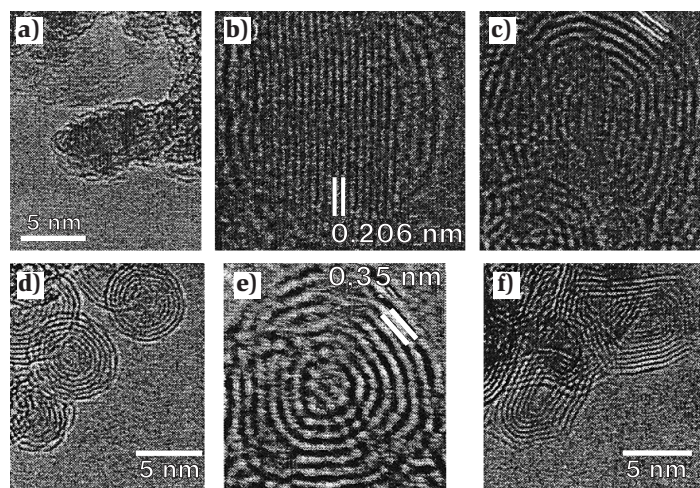
1. ábra. Szénnanohagymák elektronmikroszkópos felvétele [5]



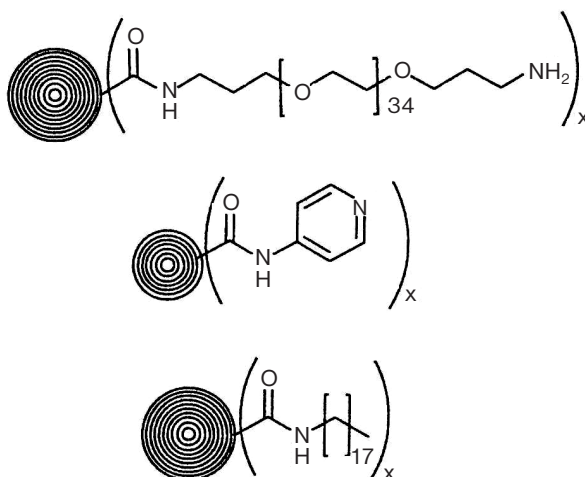
2. ábra. Matrjoskababa-szerű szénnanohagymák grafikai analógjai



3. ábra. A szénnanohagymák előállítása víz alatti szikráztatással [12]



4. ábra Nanogyémántok szénnanohagymákká való alakulása hőkezeléssel. Elektronmikroszkópos felvételek: a) nanogyémántok, b) 827 °C, c) 1400 °C, d) 1700 °C, e) 1700 °C (nagy felbontású felvétel), f) >1900 °C [7,11]



5. ábra. Amidálással funkcionizált nagyméretű (kb. 10 héjú) és kisméretű (kb. 6 héjú) szénnanohagymák [14]

## Szénnanohagymák előállítása

Az arannyal, illetve lantán-oxidokkal töltött szénrészcskékből elektronsugárral besugárzott és hőkezeléssel előállítható kis nanohagyma-mennyiségek nem bizonyultak elegendőnek a behatóbb tanulmányozáshoz. 2001-ben a japán Sano és munkatársai új eljárást dolgoztak ki szénnanohagymák előállítására nagy tisztaságú grafitrudak víz alatti szikráztatásával [6].

A grafitrudakat 16–17 V feszültséggel szikráztatták 30 A állandó áramerősség alatt. A szikráztatást a 3. ábrán bemutatott készülékben végezték. Ez az eljárás fejlettebb alternatívát nyújtott a szénnanohagymák előállítására azáltal is, hogy nagyobb, 15–25 nm átmérőjű (20–30 rétegű) hagymák előállítására is alkalmas volt. A szénnanohagymák előállításában jelentős fejlődés 1994-ben következett be, amikor Kuznetsov kimutatta [7], hogy a nanogyémántok különböző hőmérsékleteken való hőkezelése nanohagymákat eredményezhet, mint a 4. ábrán látható. A Danilenko [8] által felfedezett nanogyémántok ipari mennyiségekben is előállíthatók [9,10], ami megnyitotta annak lehetőségét, hogy a nanohagymák is könnyebben hozzáférhetővé váljanak, és részletes vizsgálataikat is lehetővé tette.

Echegoyen és munkatársai részletes összehasonlító vizsgálatokat végeztek a szénnanohagymák víz alatti szikráztatásával, illetve nanogyémántok hőkezelésével való előállítása kapcsán [12].

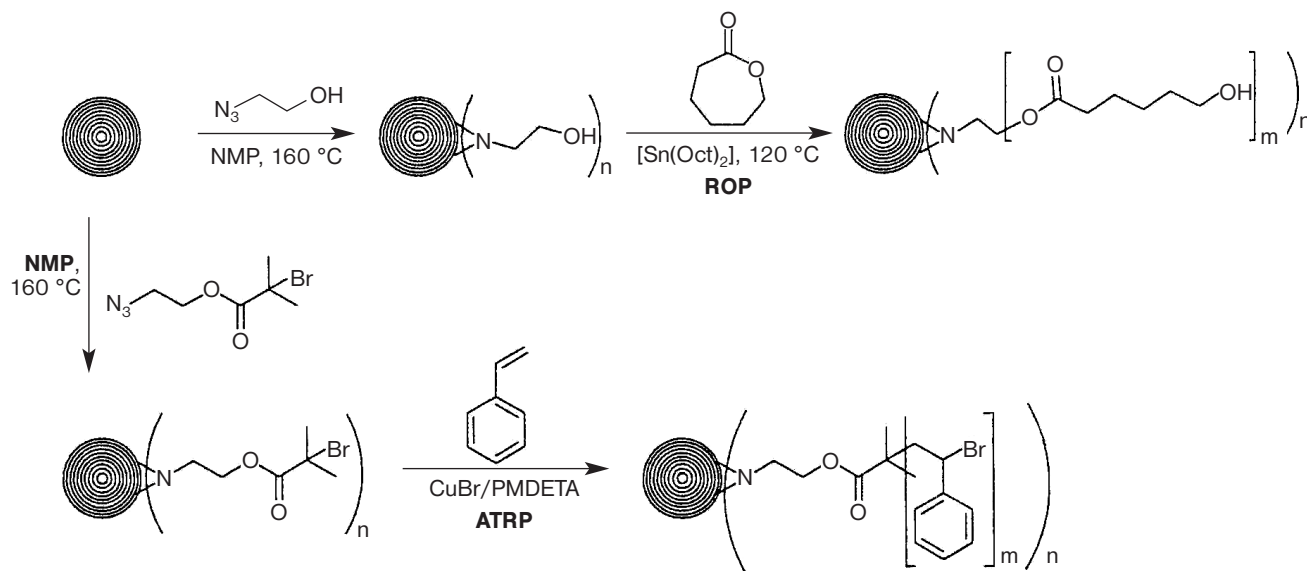
A szénnanohagymákat, illetve a nanogyémántokból való kialakulásukat az utóbbi évek során Raman-spektroszkópiával [11], röntgendiffrakcióval [13], és elektron-spin-rezonancia spektroszkópiával [11] vizsgálták. Az eredmények többek között azt mutatták, hogy kisebb méretű szénnanohagymákat (5 nm: 6–8 héjú) hőkezeléssel, nagyobb méretűeket (15–25 nm: 20–30 héjú) szikráztatással lehet előállítani.

## Kémiai tulajdonságok, funkcionizálás

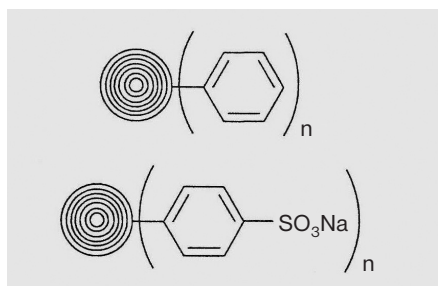
A szénnanohagymák egyedülálló tulajdonságokkal rendelkeznek. Többek között említendő például a nagy felület-tömeg arány a grafit szerű, többréteges szerkezet/morfológia és a kis súly. Felületi tulajdonságaik következtében azonban vízben és szerves oldószerekben való alacsony oldhatóságuk és diszpergálhatóságuk nehézségeket támaszt alkalmazhatóságuk és tulajdonságaik tanulmányozása elé.

Ezek áthidalására és az oldhatóság növelésére különböző felületi funkcionizálási eljárásokat javasoltak, például a felületi hibahelyekre való kovalens horgonyzással vagy addíciós reakciókon keresztül.

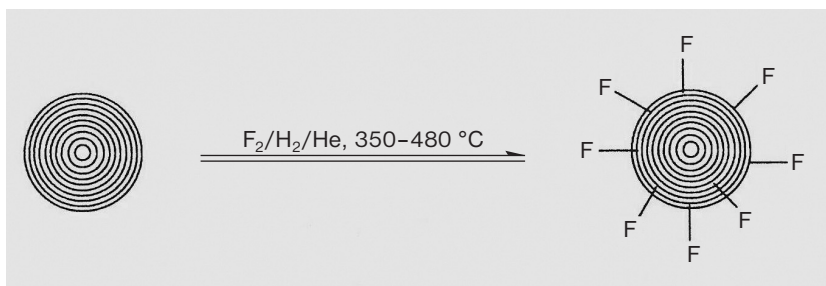




7. ábra. Szénnanohagymák (SzNH) funkcionálizálása nitrének [2+1] cikloaddíciójával, hidroxilezett SzNH-OH és SzNH-Br képződésével és -kaprolakton gyűrűnyitási polimerizálással (ROP), illetve polisztirol atomátadásos gyökös polimerizálással (ATRP) [16]



8. ábra. Szénnanohagymák fenilált és szulfonált vegyületei [12]



9. ábra. Szénnanohagymák közvetlen fluorozása [17]

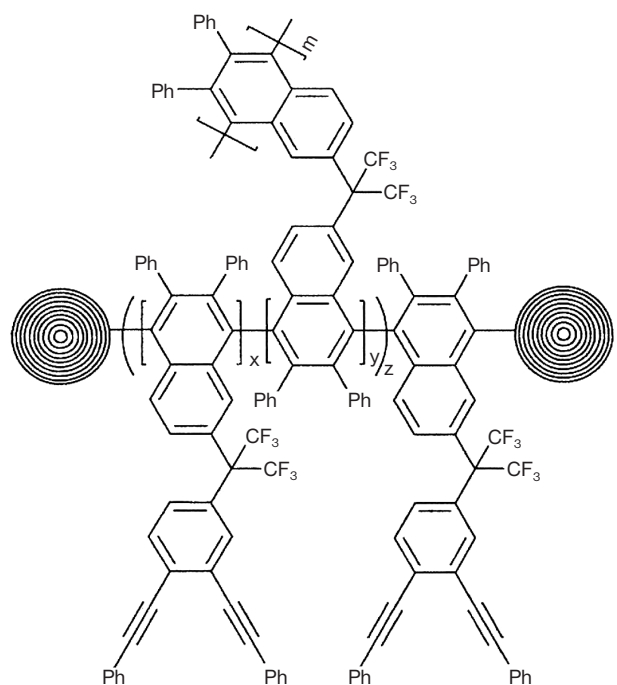
Echegoyen és munkatársai [14] beszámoltak a polietilén-glikol (PEG<sub>1500H</sub>) és 1- oktadecil-amin (ODA) addíciójáról szénnanohagymákhoz amidálási reakción keresztül. A hagymák felületi hibahelyeit karboxilcsoportok képződése érdekében salétrom-savval oxidálták, melyekhez azután különböző reagenseket kötöttek, például az említett PEG-t. Ugyanez az út vezetett más amidált termékhez is (5. ábra).

Az ODA-val való amidálás szilárd fázisú reakción keresztül eredményezte az 5. ábrán bemutatott vegyületet. Nagyméretű szénnanohagymák pirrolidin-addukthoz vezető funkcionálizálását 1,3-dipoláris cikloaddíciós reakcióval végezték [15]. Ezt azután hosszú szénláncú adduktokkal is kiegészítették (6. ábra). Gao és munkatársai [16] a szénnanohagymák nitrénekkel való [2+1] cikloaddícióját vizsgálták. A szerves azid (2-hidroxi-etil-azid és *O*-azidoetil-2-brom-2-metil-propanoát) termikus bontása után a képződött nitrének [2+1] cikloaddícióval reagáltak a szénnanohagymákkal hidroxilezett (SzNH-OH, 1: 7. ábra) és bromozott (SzNH-Br, 3: 7. ábra) nanohagymákat hozva létre. Ezt a két vegyületet a 7. ábrán bemutatott polimerek előállítására használták  $\epsilon$ -kaprolakton esetében gyűrűnyitási polimerizációval (ROP: ring-opening polymerization), illetve atom-átadásos gyökös polimerizációval (ATRP: atom transfer radical polymerization) polisztirol esetében.

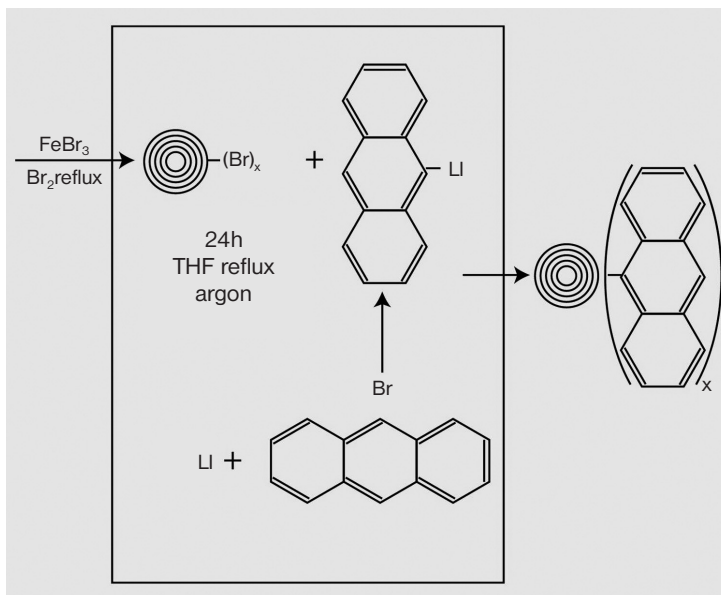
Palkar és munkatársai [12] szabad gyökös addíciós vizsgálatokat végeztek nagyméretű szénnanohagymákon benzoil-peroxidot használva fenilgyök-prekursorként. A fenilezett vegyületet oleummal (30% SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-ben) reagáltatva jutottak a szulfonált nanohagymához (8. ábra).

Nagyméretű szénnanohagymák közvetlen fluorozásáról számoltak be Khabashesku és munkatársai [17] (9. ábra). Ehhez a F<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> és He áramoltatására 350 és 480 °C hőmérsékleten alkalmazható berendezést használtak. A kisméretű szénnanohagymák funkcionálizálását kettős gyökreakción keresztül *bis-o*-diinil-arénnel (BoDA) is el lehetett végezni [18], és a 10. ábrán bemutatott terméket kapták. Antracénnel funkcionálizált szénnanohagymákat írtak le Brieva és munkatársai [19], amelyeket lítium-cserés bromozásos intermediereken keresztül kaptak. Az eljárás más policiklusos aromás vegyületek esetében is alkalmazható (11. ábra).

Az oxidálással létrehozott hidroxilezett szénnanohagymákat Luszczyń és munkatársai [20] eredményesen funkcionalizálták 3-(4,5-dimetil-tiazol-2-il)-5-(3-karboxi-metoxi-fenil)-2-(4-szulfó-fenil)-2H-tetra-zóliummal (MTS). Az előállított vegyület kiváló biokompatibilitást mutatott.



10. ábra. Szénnanohagyma-derivátum szabad gyökös polimerizálásból [18]



11. ábra. Antracénnel funkcionizált szénnanohagymák [19]

Palkar és munkatársai pridil-ligandumot tartalmazó szénnanohagymákat reagáltattak cink-tetrafenil-porfirinnel (ZnTFP), létrehozva az első szénnanohagyma szupramolekuláris komplexeket [17].

## Szénnanohagymák gyakorlati alkalmazásai

A világszerte folyó legújabb vizsgálatok alapján a nanogyémántokhoz hasonlóan a funkcionizáltan vízben oldható nanohagymáknak biokompatibilitásuk következtében rendkívül nagy jövőt jósolnak orvosi és orvosbiológiai alkalmazásokban [14]. De a funkcionizált nanohagymák sokoldalúan használhatók például kenőanyagként [21], optikai limitálóként [22], az űrkutatásban [23], a katalízisben [24], üzemanyagcellákban [25], gáztárolásra [26] és elektromágneses árnyékolásra [27] is.

### IRODALOM

- [1] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brian, R. J. Curl, R. E. Smalley, *Nature* (1985) 318, 162.
- [2] W. Krätschmer, L.D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *Nature* (1990) 347, 354.
- [3] S. Iijima, *Nature* (1991) 354, 56.
- [4] D. Ugarte, *Nature* (1991) 359, 707.
- [5] D. Ugarte, *Carbon*, (1995) 33, 989.
- [6] N. Sano, H. Wang, I. Alexandrou, M. Chhowalla, K. B. K. Theo, G. A. J. Amaratunga, *Nature* (2001) 414, 506.
- [7] V. I. Kuznetsov, A. L. Chuvilin, Y. V. Butenko, I. Y. Malkov, V. M. Titov, *Chem. Phys. Lett.*, (1994) 222, 343.
- [8] V. V. Danilenko, *Phys. Solid State*, (2004) 46, 595.
- [9] Braun Tibor, *Magyar Tudomány* (megjelenés alatt)
- [10] Braun Tibor, *Magyar Kémikusok Lapja* (megjelenés alatt)
- [11] S. Tomita, T. Sakurai, H. Ohta, M. Fujii, S. Hayashi, *J. Chem. Phys.*, (2001) 114, 7477.
- [12] A. Palkar, F. Melin, C. M. Cardona, B. Elliot, A. K. Naskar, D. D. Edie, A. Kumar, L. Echegoyen, *Chem. Asian J.*, (2007) 2, 625.
- [13] S. Tomita, A. Burian, J. C. Dore, D. Le Bolloch, M. Fujii, S. Hayashi, *Carbon*, (2002) 40, 557.
- [14] A. Palkov, A. Kumbhar, A. J. Athans, L. Echegoyen, *Chem. Mater.*, (2008) 40, 1685.
- [15] A. S. Rettenbacher, B. Elliott, J. S. Hudson, A. Amir-khanian, L. Echegoyen, *Chem. Eur. J.* (2008) 20, 1685.
- [16] L. Zhou, C. D. Zhu, W. Xu, F. F. Chen, A. Palkar, L. Echegoyen, E. S-W. Kong, *Chem. Eur. J.* (2009) 15, 1396.
- [17] Y. Liu, R. L. Vander wal, V. N. Kabashesku, *Chem. Mater.*, (2007) 19, 778.
- [18] A. S. Rettenbacher, M. W. perpall, L. Echegoyen, J. Hudson, D. W. Smith, *Chem. Mater.*, (2007) 19, 1411.
- [19] A. C. Briega, C. Jäger, F. Huiskens, L. Siller, Y. V. Butenko, *Carbon*, (2009) 47, 2812.
- [20] J. Luszczzyk, M. E. Plonska-Brezinska, A. Palkar, A. T. Dubis, A. Simionescu, D. T. Simionescu, B. Kalska-Szostko, K. Winkler, L. Echegoyen, *Chem. Eur. J.*, (2010) 16, 4870.
- [21] H. Lowe, *US Patent* 0221995, 2005.
- [22] E. Kondemas, O. Kokkinaki, M. Konstantaki, S. Couris, S. Korovin, P. Detkov, V. Kuznetsov, S. Pimenov, V. Pustovoi, *Chem. Phys. Lett.*, (2002) 357, 336.
- [23] A. Hirata, M. Igarashi, T. Kaito, *Tribol. Int.*, (2004) 37, 889.
- [24] N. Keller, N. I. Maksimova, V. V. Rodatov, M. Scheer, G. Mestl, Y. V. Butenko, *Angew. Chem. Int. Ed.*, (2002) 41, 1855.
- [25] J. J. Guo, X. W. Yang, Y. L. Yao, X. M. Wang, X. G. Liu, B.S. Xu, *Rare Met. (China)* (2006) 25, 305.
- [26] N. Sano, H. Wang, I. Alexandrou, M. Chhowalla, K. B. K. Teo, G. A. J. Amaratunga, *J. Appl. Phys.*, (2002) 92, 2783.
- [27] R. Langlet, P. Lambin, A. Mayer, P. P. Kuzhir, S. A. Maksimenko, *Nanotechnology*, (2008) 19, 1157.

# A kétdimenziós nanokémia ígéretes világa

## Grafén: a grafit hántolásától<sup>1</sup> a szénnanocsövek kicipzározásáig<sup>2</sup>

### Bevezetés

A múlt évszázad nyolcvanas éveinek végén a szén és kristályos allotrópjai, a gyémánt és a grafit a kémiai alap kutatás kiszikkadt, kimerült területének számítottak. Persze mindkét változat esetében elvégzett évszázados alap- és alkalmazott kutatás számos, jelentősnek mondható ismerethez és hasznos alkalmazáshoz vezetett. Mint a természettudományok fejlődésének számos esetében a szénallotrópok kutatása is időben úgynevezett logisztikus görbét követ, mint az az **1. ábrán** látható [1]. E fejlődési görbe elején a növekedés exponenciális, rendkívüli gyors szakaszát fokozatos lassulás követi, és a fejlődés egy laposodási, stacioner, mondhatni kimerültségi állapothoz vezet. Ez utóbbi esetben alakul ki a tudományos közösségben az a nézet, hogy a területről, jelen esetben a kristályos szénallotrópról, a grafitról a tudomány minden elvi ismeretét feltárt, esetleg már csak alkalmazási újítások következhetnek be.

A fejlődés említett logisztikus leírása esetén azonban előfordulhat, hogy a terület szellemi kimerültségi állapotából kiindulva, egy forradalmian új tudományos felismerés, paradigma hatására új exponenciális fejlődési szakasz indul. Pontosan ez történt a grafitkutatás esetében is [2].

A grafitkutatásban a forradalmi esemény 1985-ben következett be, amikor egymástól független utakon két kutatócsoport felfedezte a csupaszén fulleréneket [2–4]. Azt követte 1991-ben a szénnanocsövek [5], majd 2004-ben a grafén kísérleti [6] előállítás. Ezek mindegyike exponenciális növekedést követett, és az 1985-ben indult három változat növekedését együttes exponenciális burkológörbe jellemzi.

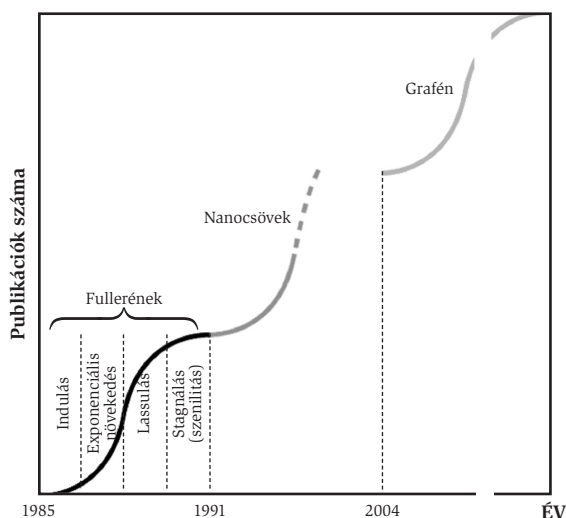
Mint előző közleményünkben vázoltuk, 1985-ben az új exponenciális fejlődés a grafitból indult ki. Ma már leírhatjuk, hogy a témában megindult teljes folyamat fordítva is feltételezhető, azaz nem feltétlenül a grafit → fullerének → szénnanocsövek → grafén az igazán jellemző fejlődési szekvencia, hanem a fordítottja is elképzelhető, azaz a grafén → szénnanocsövek → fullerének → grafit felépítési egymásutánosság is. Míg az első változatot értelmezhetjük Michelangelo mondása szerint, úgy, hogy minden kőben benne van a szobor, csak a felesleget kell róla eltávolítani, elképzelhetjük, hogy a grafitban is benne vannak, voltak a fullerének, a szénnanocsövek és a grafén, csak nem a szobrászvéso, hanem a lézersugár, a szikráztatás, a mikromechanikai hasításos hántolás vagy a kémia ollója (kicipzározás) kellett a megjelentetésükhöz.

E fokozatos eseményekkel már előző közleményeinkben is foglalkoztunk [7–9].

### Előzmények

A grafén színrelépésének egyik legjellegzetesebb és legérdekesebb velejárója, kísérője a kétdimenzionalitás a természettudományban. A dimenziók fogalma végigkísérte a tudományt annak keletkezése óta, és ezzel a történelem folyamán megszámlálhatatlan műben foglalkoztak.

Érdekességként talán meg lehet itt említeni az angol Edwin A. Abbott 1884-ben A. Square (négyyszög) szerzői álnéven publikált, a mértani két dimenzióra utaló „Flatland” (Síkföld) c. novelláját. Ebben a szerző bevezeti az olvasót a két dimenzió külön-



**1. ábra.** Az ismeretek exponenciális-logisztikus növekedését ábrázoló görbesorok Price [1] nyomán a kristályos grafitból kiindult fejlődéshez adaptálva (a görbék nem méretarányosak)

<sup>1</sup> Exfoliation.

<sup>2</sup> Unzipping.

## Grafén: a grafit hántolásától a szénnanocsövek kicipzározásáig

leges jelenségeibe [10]. Ennek analógiájára utalnak Geim és Macdonald [11] azzal, hogy az egyatomnyi, méhsejtszerű rácsban elrendezett szénatomok által megtestesített grafén jelenti az alapvető síkföldet. Ez a síkföld képezi a világegyetemben található legvékonyabb anyagot. Abbot művéről írta Isaac Asimov, hogy „a legjobb bemutatása a dimenziók észlelésének”. A könyv megjelenése óta számos kiadást ért meg, de mozifilmek és tv-műsorok is készültek belőle. A nagy sikerű „Cosmos” című tv-s előadássorozatának egyik epizódjában Carl Sagan a „Flatland”-et analógiaként használja a három fizikai dimenziótól eltérő dimenziók értelmezésére.

### Grafén

Elméletileg a grafént már körülbelül hatvan éve tanulmányozzák [12–14] annak ellenére, hogy csak virtuális képződménynek tekintették [15]. Ugyanis feltételezték, hogy a szigorúan vett 2D kristályok termodinamikailag instabilak és így a valóságban nem is létezhetnek.

Úgy vélték, hogy az alacsony dimenzionalitású kristályrácsokban jelentkező divergáló hőmérséklet-ingadozások miatt az atomok nagymértékű mozgása már az egymás közötti távolságokhoz lesz hasonló minden véges hőmérsékleten. Ezt a feltételezést kísérleti bizonyítékkal is alátámasztották [14]. A vékony fémrétegek olvadási hőmérséklete meredeken csökken a vastagság csökkenése során és a rétegek (filmek) instabillá válnak néhány tucatnyi atomréteg esetében. Ezért egyatomnyi rétegek csak nagyobb 3D szerkezetek integrált részeiként, hasonló kristályrácsú egykristályok felületén voltak ismertek. Ilyen 3D alapfelület nélkül a 2D szerkezetű anyagokról feltételezték, hogy mint fentebb említésre került, nem is valóságosak – addig, míg 2004-ben kísérletileg fel nem fedezték a szabadon létező, például szuszpenzióként vagy függesztett lemezként létező grafént [15]. Ezek a 2D grafénlemezek nemcsak hogy folytonosaknak bizonyultak, hanem bennük a töltéshordozók több ezer atom közötti távolságokat is megtehetnek szóródás nélkül [16,17]. Bizonyítottá vált, hogy a grafénban a töltéshordozók tulajdonképpen Dirac-fermionok. Ezzel a felismeréssel kezdődött a fizika számára a grafén „aranykora”.

A grafén iránt való érdeklődés eddig főleg töltéshordozói egyedállóságának köszönhető.

A kondenzált szerkezetek fizikájában a Schödinger-egyenlet vezérli a világot, mivel általában magyarázni tudja a szilárd anyagok elektronikus tulajdonságait. Ezzel szemben a grafén kivételt képez, mivel töltéshordozói relativisztikus részecskéként viselkednek, és ezek egyszerűbben és természetesebben írhatók le a Dirac-egyenlettel.

Annak ellenére, hogy semmi különlegesen relativisztikus nincsen az elektronok szénatomok körüli mozgásában, azok kölcsönhatása a grafén méhsejtszerű rácsszerkezetének periodikus potenciáljával új kvázirészecskéket hoz létre, amelyek alacsony energiáknál mozogva a (2+1) dimenziós Dirac-egyenlettel precízen leírhatók. Ezek a tömeg nélküli Dirac-fermionoknak nevezett kvázirészecskék olyan elektronok, amelyek elveszítették  $m_0$  maradék tömegüket, vagy esetleg tekinthetők olyan neutrínóknak, amelyek „e” elektrontöltést vettek fel.

A méhsejtszerű rácsokon kialakuló elektronhullámok relativisztikus jellemzése elméletileg már sok éve ismert. A grafén felfedezése viszont utat nyitott kvantumelektrodinamikai (QED) kísérleti vizsgálatokra a grafén elektronikai tulajdonságainak mérésével.

### Előállítás

Úgy tűnt, hogy alapvető fizikai és kémiai erők áthidalhatatlan kísérleti akadályokat állítanak egy valódi, egyatomnyi grafénlemezhözhozása elé.

A hagyományos kristálynövesztési eljárások sem segíthettek, mert a növekedési hőmérsékleteknél a hőingadozások a különben sík, nanométer méretű lemezeket eltorzítva háromdimenzióssá változtatják. A képződő 2D krisztallitok minimalizálni igyekeznek felületi energiájukat, ezáltal elkerülhetetlenül belezuhanak például a szénkoromban gazdagon előforduló stabilis 3D szerkezetek valamelyikébe.

### Hántolás

Mindezek ellenére léteznek utak e problémák megkerülésére. 3D szerkezetekkel való kölcsönhatás stabilizálja a 2D kristályokat növekedésük közben. Így például 2D kristályok készíthetők egy 3D kristály atomi felületén vagy szendvicsszerűen beszorítva két 3D kristálylap közé. De például azt is állíthatjuk, hogy a grafén eredetileg is létezik a grafitban mint van der Waals-kötések által összetartott grafénlemezek halmaza. Így reményeink lehetnek arra, hogy a természetet kijátszva ki vagy le tudunk választani (hántolni) a grafitról egyatomnyi kristálylemezeket olyan alacsony hőmérsékleten, hogy a lemezek a 2D növekedés magasabb hőmérsékleténél is csillapított, torzulatlan állapotban maradjanak.

### Mikromechanikai hántolás

A valóságban grafénlemezek, mint ahogyan a fullerének és a szénnanocsövek, mindig is voltak körülöttünk. Egy grafitceruza által húzott vastagabb vonalban (törmelékben) a papírra dörzsölésből jól látható, különböző vastagságú grafitlemezek képződnek. A vastag lemezek között vékonyabb, csaknem átlátszó, egyatomnyi vékonyságú kristálylemezek is képződhetnek. Úgy tűnik,



## Grafén: a grafit hántolásától a szénnanocsövek kiczipázásáig

hogy a bonyodalom nem a graféntű előállításában, hanem annak a grafitörmelék szalmakazalában való megtalálásában és az onnan való elválasztásában van.

Egy négyzetcentiméternyi felületet borító grafitörmelékben (ceruzanyomban) mindig jelen van néhány mikron méretű grafénkristallit is. Észlelésükre az elektronmikroszkópia sajnos nem alkalmas, mert nem képes megkülönböztetni az egyatomnyi nanolemezeket a különböző vastagságú grafitpikkelyektől.

A megoldást az nyújtotta, hogy a grafént nem papírhoz, hanem egy csiszolt szilíciumkocka felületéhez dörzsölték (hántolás). Ez a felület szivárványszíneket tükröz, és a grafénlemezek és a felületi szilícium oxidrétegének interferenciája egy enyhe, de jól észlelhető kontrasztot hoz létre. Szerencsére az emberi szem ezt a gyenge kontrasztot érzékelni tudja egy egyszerű optikai mikroszkópban. Ily módon még 100  $\mu\text{m}$  felületnyi grafénkristallitok is előállíthatók [18].

A grafit mikromechanikai hántolásának van egy olyan változata is, amelyiknél nyers mechanikai erőt alkalmaznak. Ehhez általában a „Nagy Rendezettségű Pirolitikus Grafitot” (NRPG) használják, ez a nemzetközi szakirodalomban általában Highly Oriented Pyrolytic Graphite (HOPG) elnevezéssel szerepel.

Az NRPG szénhidrogének 2000 K feletti hőmérsékleten való pirolízisével készül, és a keletkezett anyagot képződése után még magasabb hőmérsékleten izzítják. 3300 K fok feletti kezelés után a NRPG a grafit-egyikristályhoz hasonló elektronikus, transzport- és termikus tulajdonságokkal rendelkezik. Az NRPG polikristályos jellegű, de válogatott elektrondiffrakciós régiókban éles egykristályfoltokat mutat.

Az alkalmazás során a polírozott NRPG-szeletre Scotch ragasztószalagot tapasztottak, majd hirtelen lerántották a szeletről. Ezáltal a szalagon egy többrétegű képződmény maradt, amire ismétlődően ragasztószalagot tapasztva, újfenti lerántásokkal eljuttattak a nanoméretű grafénlapocskákig [17,18].

A Scotch ragasztószalagról való leválasztás acetonnal történt, amit bőséges vízzel és propanollal való mosás követett, majd a propanolos oldatban való ultrahangos kezelés a grafénlemezeket elválasztotta a vastagabb grafitlapoktól.

A fenti módszerekkel szintén körülbelül 100  $\mu\text{m}$  felületű grafénlemezeket sikerült előállítani. A jó minőségű, e körül a méret körüli grafénlemezek vitathatatlanul megfelelőek a legtöbb alapvető fizikai vizsgálathoz, elveket ellenőrző berendezéshez, sőt esetleg bonyolult elektronikai kapcsolatokhoz is.

Azonban a mikromechanikai-dörzsölési-kiszakítási eljárások biztosan nem képezhetik alapjait ipari méretű gyártásnak.

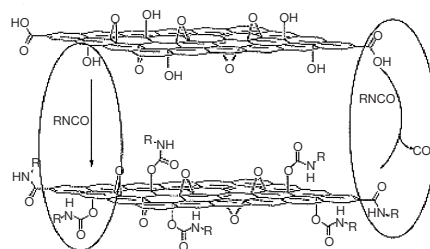
## Kémiai hántolás

A grafit-oxid a salétromsav és kálium-klorát vagy a kénsav, kálium-nitrát és kálium-permanganát keverékének grafittal való reakciójával hozható létre. A grafitrétegekben az atomok közötti kötések inerteek, kivéve, ha a grafitrácsban hibahelyek, például hiányzó szénatomok vannak. A grafitfelületen képződő egyik kémiai képződmény az epoxihíd, amiben háromszöget alkotva egyetlen oxigénatom két szomszédos szénatomhoz kötődik. Ezek az epoxihidak a grafitrács széteséséhez vezethetnek.

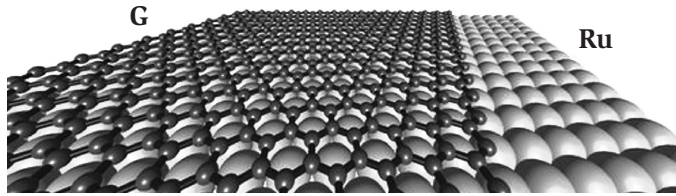
Mindegyik epoxihíd erősen feszül, mert a tartalmazott szénatomok geometriája megváltozott. Amíg a hidas atomok eredetileg csak más szénatomokhoz kötődtek egy sík, hatszöges, méhsejtszerű elrendezésben, most egy, a rács felülete fölött elhelyezkedő oxigénatomhoz kapcsolódnak egy rácsbeli szénatom helyett és ezáltal csaknem háromdimenziós torzított formát vesznek fel. Ez a geometria nem illik bele a maradék rácsba, mert ez körülbelül olyan lenne, mint amikor egy négyyszögletes dugót szeretnénk egy kerek lyukba tuszkolni. Mechanisztikusan, az oxigénatom apró ékként működik, félrelökve a hidak szénatomjait, szétfeszítve a szén-szén kötések. Az epoxidcsoportok elég feszültséget hoznak létre az érintett szénlemezekben, hogy az elszakítsa az eredeti szénkötéseket. A grafit-nanoszerkezetek oxidatív hántolása sokat ígérő módja a grafit-oxid képződésének.

Innen a grafénig nem egyszerű, de járható út vezet. Minden grafit-oxid-réteg tulajdonképpen grafén-oxidnak is tekinthető [20]. Nemrég kimutatták, hogy a grafit-oxid, az érintetlen grafitban diszpergált  $\text{sp}^3$ -hibridizált hidroxil- és epoxidcsoportokat tartalmazó szénatomokból áll. A lemezek belső és felső felületén  $\text{sp}^2$ -hibridizált szénlemezek szélén karbonil- és karboxilcsoportok helyezkednek el. Ennek következtében a grafén-oxid hidrophil és kolloid szuszpenziókat képezve vízben könnyen diszpergálódik. Viszont hidrophil jellege folytán közvetlen hántolása szerves oldószerekben nem kedvező. Ez valószínűleg a lemezek közötti erős, egymáshoz közeli oxigénnel alkotott hidrogénkötéseknek tulajdonítható. A víztől eltérően a szerves oldószerek képtelenek a lemezek közötti terekbe való behatolásra és a hidrogénkötések felszakítására, ezáltal megakadályozva azok hántolását. Azonban abban az esetben, ha a hidrogénkötésű donorcsoportok sűrűsége kémiai funkcionálizálással csökken, a grafén-oxid-lemezek kevésbé hidrophilekké válnak, a lemezek közti hidrogénkötések erőssége enyhül, megengedve a szerves oldószerekben való hántolást. A grafit-oxid funkcionálizálása lehetővé tette több származék előállítását [22], például sikeresen oldották meg a grafit-oxid butil-aminnal interkalált szililálását [23].

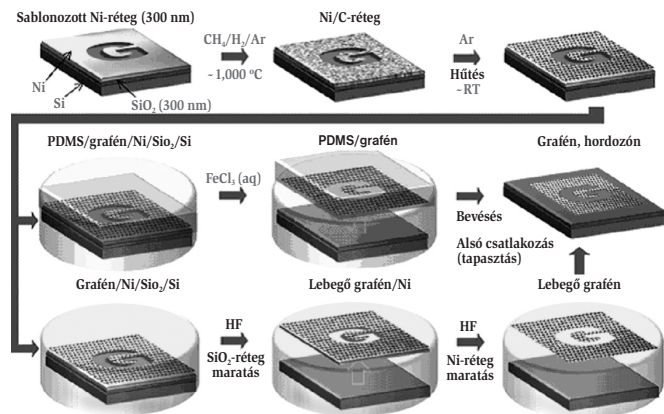
Rövidre rá kimutatták, hogy a grafit-oxid szerves izocianátokkal való kezelése a széleken lévő karboxil- és a felületi hidroxilcsoportok derivatizációjához vezethet amidok, illetve karbamát-észtereken keresztül (2. ábra). Ez jelentősen megváltoztatja a grafit-oxid hántolási viselkedését, és lehetővé teszi a grafit-oxid szerves oldószerekben egyedi grafén-oxid-lemezekké való hántolhatóságát. Ezek végleges átalakítása grafénlemezekké hidrazinoldattal való redukcióval történik.



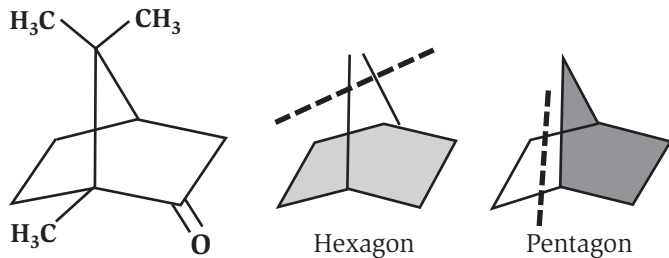
2. ábra. Grafén-oxid izocianáttal való kezelése. A szerves izocianátok hidroxil- (bal ovális) és karboxil- (jobb ovális) csoportjaival reagálva karbamát- és amid-csoportokat képeznek [25]



3. ábra. Ruténiumon epitaxiálisan növesztett grafén [26]



4. ábra. Sablonozott grafénlemez előállítása kémiai gőzlerakódással és maratással [29]



5. ábra. Kámformolekula szerkezete és szétesése hatszögű gyűrűkre [30]

ma beállítható. A nikkelrétegek maratása különösen fontos akkor, amikor a grafénlemezek más szubsztrátumra való átvitelével elektronikus kapcsolatokat kell létrehozni. Így például 1 M-os  $\text{FeCl}_3$ -ot alkalmaztak oxidáló maratószerként a nikkelrétegek eltávolítására. Emellett egy száraz átviteli módszert is alkalmaztak a grafénfilm átvitelére. Ehhez egy lágy, polidimetilsziloxán (PDMS) alátétet visznek fel KGL-lel a nikkel-subsztrátumhoz lerakódott grafénlemezekre. Alóla a nikkelfilmet  $\text{FeCl}_3$ -dal való maratással távolítják el. A rugalmas PDMS-en maradó film ezután áthelyezhető bármilyen kiválasztott szubsztrátumra [29]. A teljes előállítási folyamatot az 4. ábra mutatja be.

KGL-eljárást kámforgőz lerakódásával is alkalmaztak grafénlemez előállítására [30]. A kámfor hatszögű és ötszögű gyűrűkből és metilcsoportokból áll (5. ábra). Pirolízissal a metilcsoportok könnyen eltávolíthatók. A nikkel-subsztrátumon elvégzett pirolízis egységes grafénlemez eredményez.

## Szénnanocsövek hosszanti felhasítása

Valószínűleg a grafén jövőbeni ipari méretű alkalmazására a legsokatígérőbb eljárást a ma már könnyen és aránylag olcsón hozzáférhető egyfalú vagy többfalú szén-nanocsövek hosszanti felhasítása jelenti. Ezen eljárás megvalósításához több lehetőséget is kidolgoztak, mint azt a 6. ábra bemutatja [31]. Értelemszerűen egy nanocső felhasítása peremméretének megfelelően keskeny nanoszalagot eredményez. E szalagok elektronikai szempontból különösen vonzóknak bizonyultak, ugyanis 10 nm körüli vagy annál kisebb szélesség esetében a grafénszalagokban az elektronok a szalag hosszában kénytelenek mozogni és ennek eredményeként a grafén félvezetőként viselkedik.

## Epitaxiális növesztés

Az epitaxiális növesztés során egy szubsztrátum atomi szerkezetét használják a grafénlemez kialakítására. A grafénlemez a szubsztrátum szerkezete által ellenőrzött, rétegszerűen képződik. Így került például alkalmazásra szubsztrátumként a ruténium. A szénatomokat magas hőmérsékleten (1150 °C) abszorbeáltatták a ruténiumba, majd az együttest 850 °C-ra hűtötték. Ezáltal a szén jelentős mennyisége a ruténium felületére diffundált, ahol vékony grafénréteget képezett (3. ábra) [26]. Hasonlóan sikeres próbálkozásokról számoltak be  $\text{SiO}_2$ -szubsztrátum alkalmazásával [27].

## Etil-alkohol nátriumos redukciója

Újabban, bizonyos mértékig meglepő módon, a grafén közvetlen kémiai szintézisét is megvalósították. Ez a szerzők szerint grammnyi mennyiségű grafénelőállításra is alkalmas. Az eljárás során etil-alkoholt reagáltattak nátriummal, és ez egy köztes terméket eredményezett, amit pirolizálva grafénlemezhez jutottak; ezt enyhe ultrahangos szonikálással diszpergálták [28].

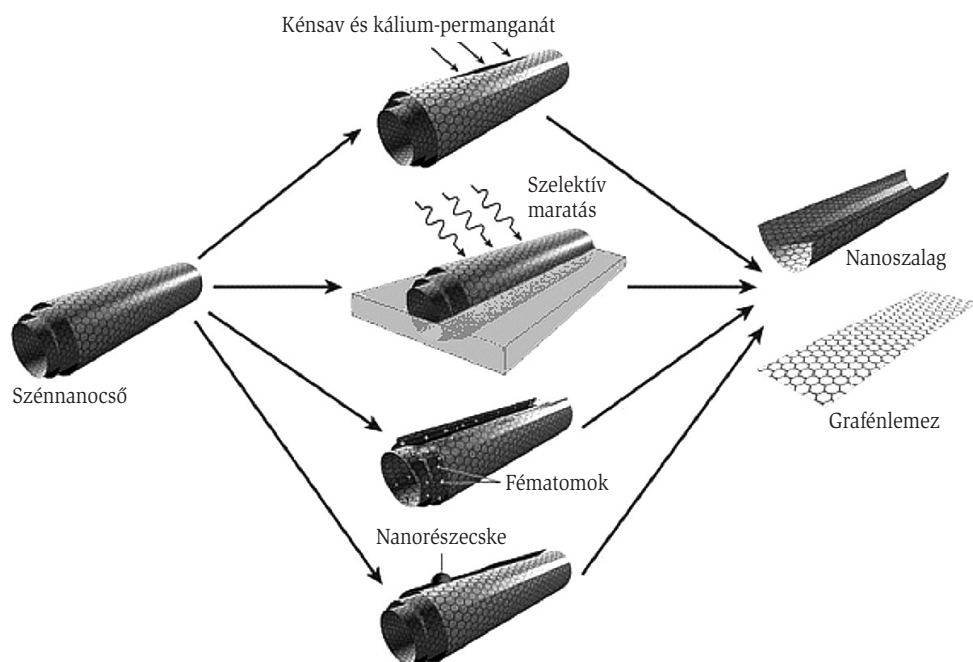
## Kémiai gőzlerakódás (KGL)<sup>3</sup>

Több mint negyven éve ismeretes, hogy szénhidrogén-gőzlerakódás (KGL) vékony grafitréteget tud létrehozni reaktív nikkel- vagy átmeneti fémkarbid-felületeken. Azonban a nikellapokra adszorbeált jelentős szénmennyiségekből grafénlemezkek helyett inkább vastag kristályos grafitréteg képződik.

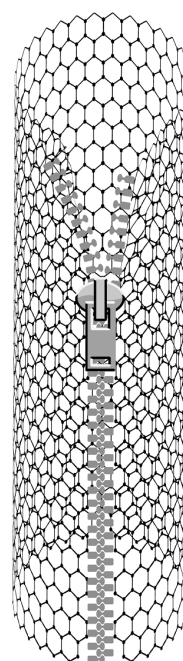
E probléma megoldására vékony, körülbelül 300 nm-nyi nikkelréteget  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  szubsztrátumra vittek fel elektronsugaras párologtatással, majd ezt az együttest egy kvarccsőben argon áramoltatása közben 1000 °C-ra hevítették. Metángázkeverék ( $\text{CH}_4$ :  $\text{H}_2$ :  $\text{Ar}$  = 50:65:200) áramoltatásával hasonló hőmérsékleten, 25 °C-ra való lehűtés után grafénlemezke képződött a nikkel felületén. A nikkelréteg vastagságának maratással való változtatásával a grafénlemezkek szá-

<sup>3</sup> Chemical Vapour Deposition (CVD).

## Grafén: a grafit hántolásától a szénnanocsövek kicipzározásáig



6. ábra. Egyfálú szénnanocső sematizált kicipzározása [31]



7. ábra. Grafénnanoszalag előállítása kicipzározással (grafikai vázlat)

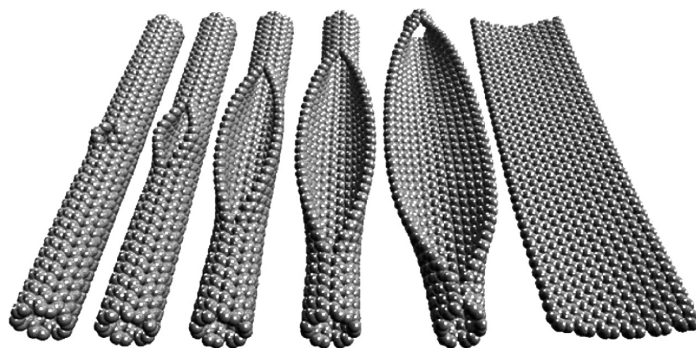
### Kicipzározás

Mivel az egyfálú szénnanocsövek tulajdonképpen összecipzározott grafénhengereknek is tekinthetők, a hengerek kicipzározásának gondolata nyilvánvalóan ígérkezett (7. ábra).

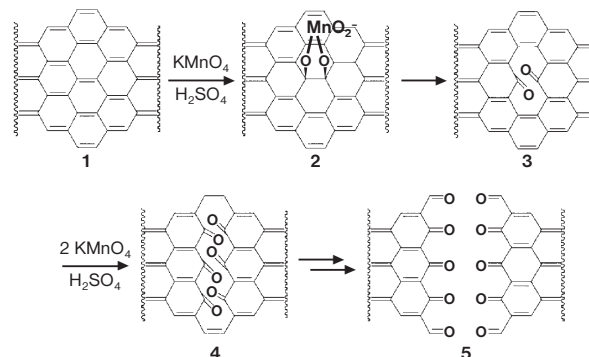
### Oxidációs kicipzározás

Többszálú nanocsöveket tömény kénsavban szuszpendálva, azután egyórás kálium-per-manganátos oxidálással szobahőmérsékleten (22 °C), majd 55 °C-on újabb egyórás reagáltatással grafén-oxid nanoszalagokat állítottak elő. Ezek könnyen oldódtak vízben (12 mg·ml<sup>-1</sup>) és más poláros szerves oldószerekben. Annak ellenére, hogy úgy tűnik, hogy a nanocsövek kicipzározása fokozatosan és egyenes vonalban történik, mint a 8. ábrán látható, a kicipzározás pontos iránya még nem ismeretes. A kicipzározás kémiai mechanizmusa a 9. ábrán leírt módon játszódik le. Ezt az alkének már ismert permanganátos oxidálására alapozták. A következő sebességhatározó lépés a manganát-észter képződése, ami további oxidálással a dehidratáló közegben dionhoz vezet. A képződött ketonok szomszédsága eltorzítja a β,γ-alkéneket, ezáltal hajlamosabbá téve őket az újabb permanganátos oxidációra. A reakció előrehaladtával a β,γ-alkének feszülése enyhül, ezáltal a karbonil mozgásához több hely adódik. Azonban a kötőszög által okozott növekvő rés (vagy repedés, amennyiben az a nanocső végén képződik) egyre reakcióképesebbé teszi a β,γ-alkéneket. Tehát amint ez a felszakadás létrejön, a nanocső további kicipzározása fokozódik. A ketonok tovább reagálhatnak O-protonált formáikon keresztül egészen karboxilsavakig, és ezek szegélyezik a nanoszalagok peremét. Végül a kötőszögek lazulása által okozott feszülés enyhülése lelassítja a dionképződést és kicipzározást, és ez okozza a nanocső teljes szétnyílását.

8. ábra. Egyfálú szénnanocső fokozatos kémiai kicipzározása [32]



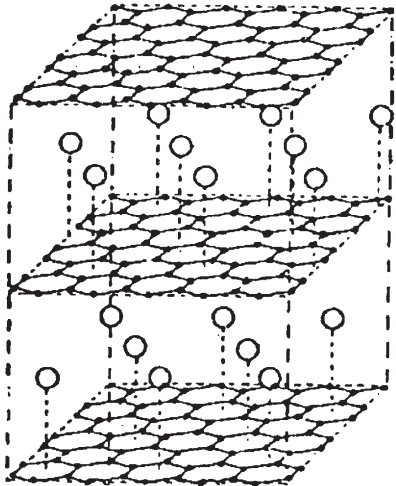
9. ábra. Fokozatos oxidációs kicipzározás reakció-mechanizmusa [32]



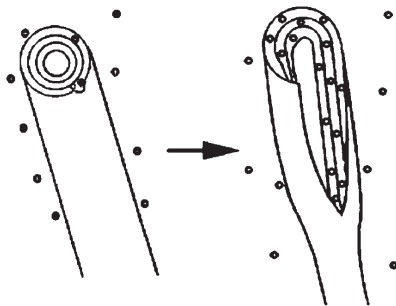


## Interkalációs kicipzározás

A grafitrétegeket összetartó gyenge van der Waals-kötések révén e rétegek közé interkalációval K-, Na-, Br-, I- és még számos elem-réteg ékelődhet be. Lévéen, hogy a többfalú nanocsövek tulajdonképpen összecsavart grafénnanohengereknek tekinthetők, valószínűnek látszott, hogy az interkalálást ez utóbbiakban is meg lehet valósítani. Nemrég ezt kísérletileg is igazolták [34]. Az ammóniával és lítiummal interkalált nanocsöveket savval kezelték, majd hirtelen felhevítették, ami a nanocsövek egy részének szét-feszítéses kicipzározásához, illetve nanoszalagokhoz, részben kinyílt nanocsövekhez és grafénnanolemezekhez vezetett (10. ábra).



10. ábra. Grafit-interkaláció és az interkalált többfalú szénnanocső kicipzározása [38]



## Kicipzározás argonplazmás maratással

Mint minden szénnanocső kicipzározásánál, az egyik kihívást annak a lehetőségnek a megteremtése jelenti, hogy a nanocsövek hosszukban nyíljanak szét anélkül, hogy keresztmetszetükre sor kerülne. A nemrég kidolgozott eljárás során [35] a 4–8 nm átmérőjű, többfalú nanocsöveket előbb egy maratási tokként szolgáló lágy polimetilmetakrilát (PMMA) rétegbe ágyazták (11. ábra). A körülbelül 300 nm vastagságú rugalmas PMMA-réteg szilárd szubsztrátumaként szolgált. Száradás után a PMMA-réteget KOH-oldattal leoldották és a PMMA-ban rögzített többfalú nanocsőfilmet többszöri 10 W-os argonplazma-kezelésnek vetették alá. A PMMA-rétegnek köszönhetően külső nanocsőrétegek váltak le grafén-nanoszalag formájában acetongőz hatására, és ezt a polimer maradványok eltávolításának érdekében 300 °C-ra izzították.

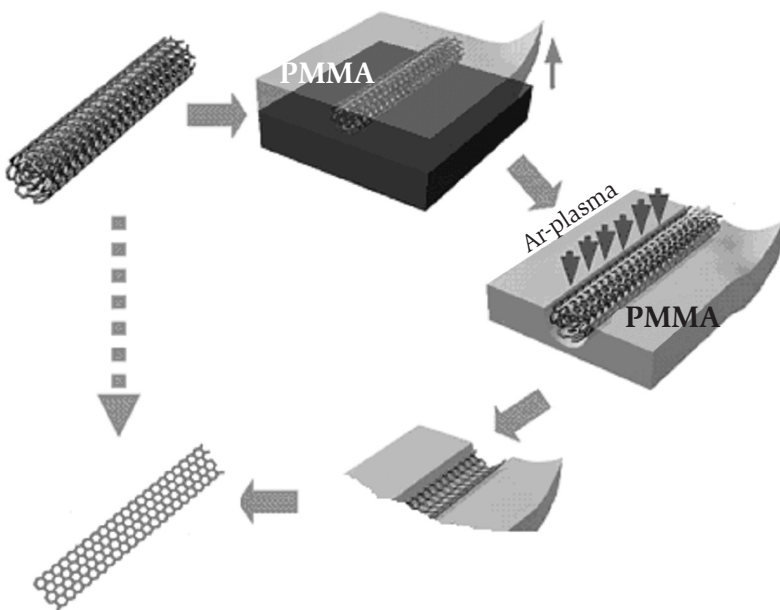
## Nanocsövek katalitikus kicipzározása

Az ollózásos kicipzározásnak elnevezett eljárásnál [36] a nikkel-, illetve vas- [37] katalizátoros hidrogénezéssel hasították fel a szénnanocsöveket. Nanoméretű nikkel- vagy vasrészecskéket frissen hántolt, nagy rendezettségű pirolitikus grafit (NRPG/HOPG) felületére rétegezték. Ezután a grafitréteget magas hőmérsékleten Ar/H<sub>2</sub> áramban edzették. A keletkezett grafénlemezek élszerkezetét a rétegezett fémrészecskék mérete határozza meg (12. ábra).

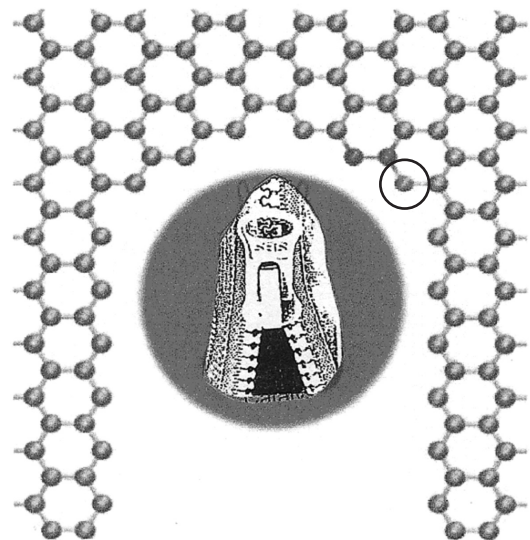
## Alkalmazások

Ami a grafén gyakorlati alkalmazásait illeti, számos vonalon folynak világszerte kutatások. A grafén nagy felület/tömeg arányát és nagy vezetőképességét reménykeltőnek tekintik kompozit anyagok és elektromos akkumulátorok előállítására. Atomí vékonysága és fényáteresztő képessége biztató lehetőségeket ígér az elektronmikroszkópiában,

11. ábra. Plazmamaratásos nanocső-kicipzározás [35]



12. ábra. Katalikus nanocső-kicipzározás. (Körrel jelölve a fémnanorészecske) [36]





## Grafén: a grafit hántolásától a szénnanocsövek kicipzározásáig

mechanikai robusztussága és súlytalansága jobb mikromechanikai rezonátorokat tehet lehetővé. Ugyancsak sokat ígérő a külső elektromos tér által való hangolhatósága szupravezető tranzisztorok és rendkívül érzékeny kémiai detektorok létrehozásában [38]. Hidrogéntárolási kapacitásához is komoly reményeket fűznek [39]. Különösen biztatónak tekinthető a szilícium helyettesítése grafénnel: így még vékonyabb integrált áramkörök készülhetnek. Ugyanis feltételezik, hogy a szilícium alapvető tulajdonságainak a lehetőségei 15–20 éven belül kimerülnek – akkor, amikor az egyedi áramkörök mérete 10 nanométerre csökken.

A grafén rendkívül finoman beállítható, valószínűleg egyetlen benzolgyűrűig, más egyatomnyi sík rétegű, az elektronikai iparban használt anyagoktól – például a szilíciumtól vagy a fémektől – eltérően stabil és vezetőképessé marad a molekulaméreténél is. Gordon Moore, az elektronikai ipar egyik úttörője körülbelül 40 éve kimutatta, hogy az egységnyi felületre felvihető tranzisztorok száma körülbelül 18 hónaponként megkétszereződik. Ez a jövődőlés Moore törvényeként vált közismertté. A grafén alkalmazása esetleg a Moore-törvény érvényességének meghosszabbításához is vezethet.

## Befejezés

Befejezésül talán röviden említésre érdemes a grafén valószínűleg egyedülálló tulajdonságát tükröző két ígéretes tény. A grafénban szobahőmérsékleten rezgő atomok körülbelül 1,0 mikroohm/cm értékű rezisztivitást hoznak létre (a rezisztivitás az elektromos ellenállás fajlagos mértéke; egy anyagdarab ellenállása egyenlő a rezisztivitásával szorozva az anyagdarab hosszával és osztva keresztmetszetének felületével). Ez az érték a grafén esetében körülbelül 35%-kal kedvezőbb az ezüsténél. Az ezüst jelenleg a szobahőmérsékleten mutatott legkisebb rezisztivitású anyag.

A másik különlegesség az atomméretnél mért mechanikai szilárdság. Ha azt az erőt vesszük alapul, ami egy vízespohárba feszített műanyag fólia ceruzával való átszúrásához szükséges, akkor ha egy pohár nyílására műanyag fólia helyett grafénlemez helyeznénk, a felületet átszúrandó ceruza átszúrás nélkül elbírná a ceruza végén egyensúlyozó személygépkocsi súlyát.

## IRODALOM

- [1] D. J. deSolla Price, Kis tudomány, nagy tudomány, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1976.
- [2] Braun Tibor, Magy. Kém. Lapja, (2007) 62, 109.
- [3] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, F. R. Curl, R. E. Smalley, Nature, (1985) 318, 162.
- [4] W. K. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Hoffman, Nature, (1990) 347, 354.
- [5] S. Iijima, Nature, (1991) 354, 56.
- [6] K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov, A. K. Geim, Proc. Nat. Acad. Sci. (USA), (2009) 102, 10451.
- [7] Braun Tibor, A káprázatos C60 molekula, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996.
- [8] Braun Tibor, Szénzférák zenéje. Fullerénkémiai kalandozások, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2000.
- [9] T. Braun (Ed.), Nuclear and Radiochemical Approaches to Fullerene Science, Kluwer, Dordrecht, 2000.
- [10] E. A. Abbott, Flatland: A Romance of Many Dimensions, Seely & Co., 1884.
- [11] A. K. Geim, A. H. MacDonald, Phys. Today, Aug (2007) 35.
- [12] P. R. Wallace, Phys. Rev., (1947) 71, 622.
- [13] J. W. McClure, Phys. Rev., (1956) 104, 666.
- [14] J. C. Slonczewski, P. R. Weiss, Phys. Rev., (1958) 109, 272.
- [15] E. Fradein, Phys. Rev., B, (1986) 33, 3263.
- [16] N. D. Mermin, Phys. Rev., (1958) 176, 250.
- [17] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, Science, (2004) 306, 5696, 666.
- [18] <http://www.grapheneindustries.com>
- [19] J.-L. Li, K. N. Kudin, M. J. McAllister, R. K. Prud'homme, I. A. Aksay, R. Car, Phys. Rev. Lett., (2006) 96, 176101.
- [20] M. Hirata, T. Groton, M. Ohiva, Carbon, (2005) 43, 303.
- [21] A. Lerf, H. He, T. Riedl, M. Forster, J. Klinowski, J. Phys. Chem. B, (1998) 102, 4477.
- [22] A. Lerf, H. He, M. Forster, J. Klinowski, Solid State Ionics, (1997) 101–103, 857.
- [23] I. Matsuo, T. Fukunaga, T. Fukutsuka, I. Sugie, Carbon, (2004) 42, 2117.
- [24] S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Domnet, K. M. Kohlhaas, E. Zimney, E. A. Starch, R. D. Pinner, SonBinh T. Nguyen, R. Ruoff, Nature, (2006) 442, 282.
- [25] S. Stankovich, R. D. Piner, S. T. Nguyen, R. S. Ruoff, Carbon (2006) 44, 3342–3347.
- [26] P. W. Sutter, J.-I. Flege, E. A. Sutter, Nature, Phys., (2008) 6 April.
- [27] M. Ishigami, J. H. Chen, W. G. Cullen, M. S. Fuhrer, E. D. Williams, Nano Lett., (2007) 7, 1643.
- [28] M. Conchair, P. Thornardson, J. A. Stride, Nature, Nanotech., (2009) 4, 30.
- [29] K. S. Kim, Y. Zhao, H. Yang, S. Y. Lee, J. M. Kim, K. S. Kim, J.-H. Ahn, Ph. Kim, J.-Y. Choi, B. H. Hong, Nature, (2009) 457, 706.
- [30] P. R. Somani, S. P. Somani, M. Umeko, Chem. Phys. Lett., (2006) 430, 56.
- [31] M. Terrones, Nature, (2009) 458, 845.
- [32] D. V. Kosynkin, A. L. Higginbotham, A. Sinitskii, J. R. Lomeda, A. Dimiev, B. K. Price, J. M. Tour, Nature, (2009) 458, 672.
- [33] T. Enoki, M. Suzuki, M. Endo, Graphite Intercalation Compounds and Applications, Oxford University Press, NY, 2003.
- [34] A. G. Cano-Marquez, F. J. Rodriguez-Macias, J. Campos-Delgado, C. G. Espinosa-Gonzalez, F. Tristan-Lopez, D. Ramirez-Gonzales, D. A. Cullen, J. Smith, M. Terrones, Y. I. Vega-Cantu, Nano Lett., (2009) 9, 1527.
- [35] L. Jiao, L. Zhang, X. Wang, G. Diankov, H. Dai, Nature, (2009) 458, 877.
- [36] L. Ci, Z. Ku, L. Wang, F. Ding, K. F. Kelly, B. I. Yakobson, P. M. Ajayan, Nano Res., (2008) 1, 116.
- [37] I. S. Datta, D. R. Strachan, S. M. Khamis, A. T. C. Johnson, Nano Lett., (2008) 8, 1912.
- [38] F. Schedin, A. K. Geim, S. V. Morozov, E. W. Hill, P. Blake, M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, Nature Materials, (2007) 6, 652.
- [39] S. Patchkovskii, J. S. Tse, S. N. Yurchenko, L. Zhechker, T. Heine, G. Seifert, Proc. Nat. Acad. Sci., (2005) 102, 10439.

# Égbeszökő grafénkutatás

A tudományos kutatás fontosságára, jelentőségére, illetve a tudomány fejlődésére a múltban nem ritkán használtak szuperlatívuszokat. Talán a jelen címben szereplő „égbeszökő” jelző sem annyira kifejező, mint az erre használt angol „sky-rocketing”. Mindez ebben az írásban az alig tíz éve felfedezett grafénra, illetve grafénkutatásra is vonatkozik, és tudományos világszenzációként kezelhető, illetve kezelendő.

Jelen szerző a közelmúltban többször tolmácsolta azt az izgalmat, amit a szénnanoszerkezetek kutatása a grafénig vezető úton az utóbbi évtizedekben világszerte előidézett [1–3].

A fókuszpontban a grafén áll, aminek a felfedezői a Nobel-díjtól kezdődően (2010) minden elképzelhető díjat megkaptak és aminek fejlődési és átfogó alkalmazási lehetőségeit maguk a felfedezők többször, legutóbb 2012 októberében is vázolták [4]. De mások sem voltak szűkszavúak e téren [5–8].

A fentiek után a lelkesedés fokozása, illetőleg fokozhatósága nehezen lett volna elképzelhető. Ennek ellenére megtörtént és újfent az angol nyelvből kell elővegyünk egy jelzőt, amire magyarul nem találunk megfelelőt. A „big thinking”-re gondolunk, és amit e mögött megjelenni látunk, a „big money”-ra. Ez utóbbit már magyarul is „nagy pénz”-ként tudunk kifejezni, és az **1. ábrán** a nanotechnológiai kutatás anyagi támogatásának példáján már látható [9].

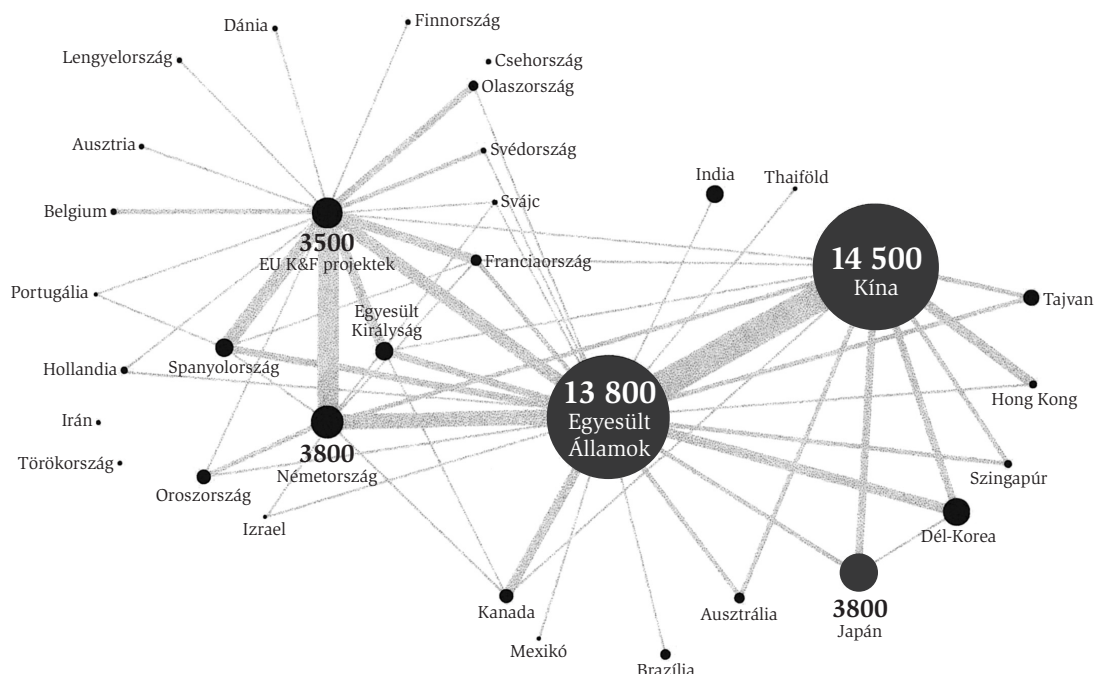
A felfedezések jelentőségének, illetve szakterületük időbeni jellemzésére eddig általában az elismert folyóiratokban publikált közlemények számát használták indikátorként. Kiegészítésként az alap kutatási eredmények műszaki-technológiai alkalmazására a szabadalmak időbeni változását tekintették mérvadónak. Ezt tettük mi is [1–3].

A tudományos kutatásban a pénzt, illetve az anyagi ráfordítást, támogatást általában nem nyilvános, ellenőrizhető volta miatt csak szőrmentén, vagy nagyon óvatosan használták indikátornak, és a tudományos és más sajtóban leginkább úgy került szóba, hogy a kutatók kevesellték azt a támogatást, amit országuk, intézményük stb. kutatásaikra rendelkezésükre bocsát.

2013. január 28-án robbant a bomba. *Neelie Kroes*, az Európai Bizottság holland elnökhelyettese nyilvánossá tette minden idők legnagyobb európai kutatási támogatásának tekinthető összegét, azaz egyenként 1,3 milliárd eurót két kiemelt kutatási projektre.

Az átfogó nemzetközi pályázatot [10] az EU „*Future and Emerging Technologies Flagship Initiatives (FET)*” néven hozta létre, és a szűrések után fennmaradt hat „zászlóshajó” közül emelte ki az említett megatámogatásra a *grafénkutatást* és az *emberi agy*

**1. ábra.** A nanotechnológiai kutatások határokat átszelő keresztfinanszírozása a folyóiratcikkek alapján számolva [10]. A fekete körök mérete az összes támogatott folyóiratcikk számával arányos. A szürke vonalak arányosak az országokból közösen támogatott folyóiratcikkek számával



## Égbeszökő grafénkutatás

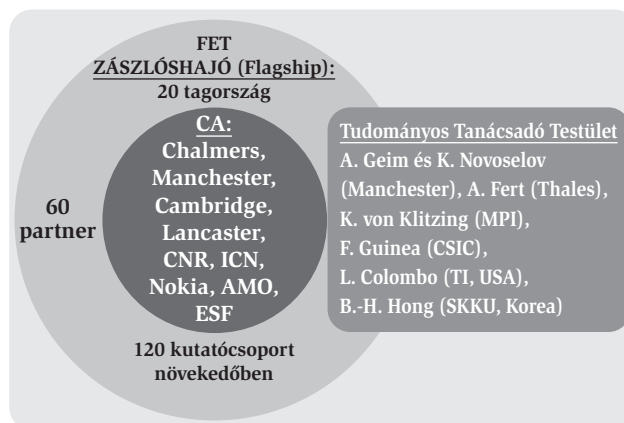
kutatását. Talán érdemes itt megemlíteni azt a négy, szintén kiemelt, de lemaradt projektet, amely valószínűleg érthetően ellenérzéseket is kiváltott, főleg a tematikailag érdekelt körökben. Ezek a következők voltak: a társadalom modellezésére szolgáló, FutriCT elnevezésű kutatás; egy számítógépes „virtuális beteg” program terápiák tesztelésére; egy új generációs felhasználóbarát házi robot; valamint egy „védő-őrző angyal” chip személyek és környezetek felügyeletére és figyelmeztetésére. Az agykutatói kiemelt projekttel itt nem foglalkozunk.

Az örömdák mellett azért szóvá kell tenni azt is, hogy a két kiemelt projekt támogatási összegének a kifizetésére vonatkozó, bizonyos mértékű kétkedés még nem teljesen oszlott el [10].

A grafénkutatási projektet több mint száz kutatócsoport részvételével a göteborgi Chalmers Műszaki Egyetemen dolgozó *Jari Kinaret* vezeti [11]. Tervezett összetételét, tudományos tanácsadó testületét a **2. ábra** mutatja. Működése kezdetekor a projekt kutatási konzorciummá alakult.

A FET-projekt víziója szerint:

- A grafén zászlóshajó (FET) projekt törekvése olyan széles körű, fókuszált, interdiszplináris európai kutatási közösség létrehozása, amely a grafén egyedülálló tulajdonságaira alapozott radikális technológiai elmozdulást kíván az információs és kommunikációs technológiában.
- A grafénban megvan az a potenciális erő, amely rövid és hosszú távon is mély hatással lehet az információs és kommunikációs technológiára (ICT). A grafén integrálása a szilíciumalapú elektronikával, és a szilíciumot helyettesítve bizonyos alkalmazásokban, nemcsak jelentős teljesítményjavulást tesz lehetővé, hanem még inkább elősegíti az új ICT-alkalmazásokat más területeken is.
- A grafénkutatás példázza azt az átfogó nanotechnológiát, amiben az alapkutatási felfedezések gyorsan eljuttathatók az ipari alkalmazásokig és gyártási termékekig.



2. ábra. A FET grafénkonzorcium összetétele [11]

1. táblázat. A grafénkutatás értékesítésére alakult kis- és közepes vállalkozások az Egyesült Államokban, Nagy-Britanniában és Kínában [12]

Ország	Vállalkozás	Székhely	Egyetemi hovatartozás illetve együttműködés	Website- oldalak száma
USA	First Nano	Long Island, NY	–	139
	Vorbeck	Jessup, MD	Princeton University	48
	Cheap Tubes	Vermont	–	39
	Nanotek Instruments	Dayton, OH	Wright State University	32
	NanolIntegris	Skokie, IL	Northwestern University	31
	Angstrom Materials (a Nanotek spin-off)	Dayton, OH	Wright State University	30
	XG Sciences	Lansing, MI	Michigan State University	15
	Graphene Laboratories	Reading, MA	Columbia University	14
	Vulvox	Long Island, NY	–	13
	Graphene Works	Atlanta, GA	Georgia Institute of Technology	10
	Xolve (formerly Graphene Solutions)	Platteville, WI	University of Wisconsin	7
	Graphene Energy	Austin, TX	University of Texas	5
UK	Graphene Research	Manchester	University of Manchester	69
	Graphene Industries	Manchester	University of Manchester	7
	Durham Graphene Science	Durham	Durham University	8
Kína	Nano Technology Company	Nanjing, Jiangsu	Nanjing University	104
	XP Nano Material Company	Xiamen, Fujian	–	71
	Sinocarbon Technology Materials	Taiyuan, Shanxi	Chinese Academy of Science	59
	Xiamen Knano Graphene Technology Company	Xiamen, Fujian	Huaqiao University	53
	Nano-Brother Laboratory	Haerbin, Heilongjiang	Harbin Institute of Technology	29

## Égbeszökő grafénkutatás

A grafénprojekt részleteit a kísérleti fázisban alakítják ki, és legalább a következő alterületeket veszik sorra: nagy sebességű elektronika (nagy teljesítményű alkalmazások), átlátszó és flexibilis elektronika (fogyasztói elektronika), fotonika és plazmonika, spintronika, grafénalapú mechanikai alkatrészek és rendszerek, grafénalapú könnyű kompozitok, graféntermelés és -funkcionalizálás.

Az EU-bizottság döntése annyira új és oly mértékben meglepte még a projekt nyerteseit is, hogy egyelőre nem tudják biztosan, hogyan lehet a legmegfelelőbben belevágni egy ilyen országnyi méretű és támogatású megaprojektbe. Mint tudjuk, a kutatók – amióta világ a világ – anyagilag kielégíthetetlenek, így Kinaret társait bizonyos mértékben lehangolta, hogy az első 30 hónap során az alprojektek mindegyike „csak” 54 millió euróra számíthat.

Talán érdemes még rövid említést tenni arról, hogy az itt leírt megaprojektet megelőzően Geim és Novoselov 2004-ben tett grafénfelfedezésétől kezdődően milyen erőfeszítések folytak világszerte a felfedezés gyakorlati, technológiai alkalmazásaira vonatkozóan. Egy nagyon érdekes kutatás során, a grafén website-oldalak számítógépes szövegbányászatával (text mining) azt a következtetést vonták le, hogy a forgalmazható ipari graféntermékeket előállító nagyipar felé a grafénkutatást alkalmazó kis- és közepes vállalkozásokon keresztül vezet az út. Az **1. táblázat** (l. 175. oldal) a grafénkutatás értékesítésére alakult kis- és közepes vállalkozásokat mutatja be az Egyesült Államokban, Nagy-Britanniában és Kínában [12].

Az első ipari forradalom Angliában kezdődött a 18. század végén, a textilipar gépesítésével. A második ipari forradalom a 20. század elején kezdődött, amikor Henry Ford megalkotta és alkalmazta a futószalagos gyártást és ajtót nyitott a tömeggyártásnak. A két első ipari forradalom gazdagabbá és urbánusabbá tette az embereket. Jelenleg kialakulóban van egy harmadik ipari forradalom. Az ipari gyártás digitálissá válik. Számos figyelemre méltó technológia konvergál: okosabb szoftverek, új alapanyagok, ügyesebb robotok, új gyártási folyamatok, valamint számos, a világhálóra alapuló szolgáltatás. A múltbeli gyárak az egyedi termékek milliárd darabos uniformizált előállítására épültek. Az irány jelenleg az egyéni igények korlátlan kielégítése felé mutat. De annak a költsége pillanatnyilag túl nagy, hogy egy változatos formában megjelenő termékből a felhasználó vágyainak megfelelően sokkal kisebb darabszámot állítsanak elő.

A jövő ipara az egyedi, olcsó gyártás megalapozásával, amilyen például a háromdimenziós nyomtatás, utat nyithat a harmadik ipari forradalomnak, aminek talán a grafén lehet az egyik alappillére.

### IRODALOM

- [1] Braun Tibor, Magy. Kém. Lapja (2012) 67, 84.
- [2] Braun Tibor, Magy. Kém. Lapja (2012) 67, 374.
- [3] Braun Tibor, Magy. Kém. Lapja (2009) 64, 371.
- [4] K. S. Novoselov, V. I. Falko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, K. Kim, Nature (2012) 490, 192.
- [5] K. A. Jenkins, Am. Scientist (2012) 100, 388.
- [6] <http://www.sciencedaily.com/releases/2013/01/130113144923.htm>
- [7] R. van Norden, Nature (2011) 469, 14.
- [8] J. Parnell, <http://www.rtcc.org/hat-can-graphene-do-for-climate-change/>
- [9] P. Shapira, J. Wang, Nature (2010) 468, 627.
- [10] K. Kupferschmidt, Science (2013) 339, 497.
- [11] J. Kinaret, [http://ec.europa.eu/research/industrial\\_technologies/pdf/graphene-presentations/4-5-kinaret-220\\_32011\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/graphene-presentations/4-5-kinaret-220_32011_en.pdf)
- [12] S. J. Arora, J. Youtie, Ph. Shapira, L. Gao, T. T. Ma, Scientometrics (2013) megjelenés alatt



# A kristályos szénnanotudomány legújabbkori diadalútja

## Interdiszciplináris fullerén-, nanocső- és grafénkutatási eszkaláció

Arra a kérdésre, hogy a huszadik század végén, illetve a huszonegyedik század elején a periódusos rendszer elemei közül melyiknél lett volna várható jelentős, látványos fejlődés a kémiai tudományos kutatásban, kevesen említették volna a tulajdonságaiban sokoldalúan kiismert és megismert, karakterében és tapintható valóságában szürke-fekete szenet, a grafitot.

A szénkémia káprázatos, legújabb kori megújulása 1985-ben vette kezdetét, amikor Kroto, Curl és Smalley [1] felfedezték a fullerének grafitplazma generálta tömegspektrometriai létét. 1990-ben, következő lépésként, Krätschmer, Huffman és doktoranduszaik [2] bebizonyították, hogy a fullerének a kristályos szén új allotrópjai, amit alig egy évre rá, 1991-ben a japán Iijima [3] ragyogó felismerése, a szénnanocsövek felfedezése követett. A tudományos kutatás következő csodájára már csak 2004-ig kellett várni, amikor az angol-orosz Geim-Novoselov [4] szerzőpárnak sikerült berobbantania a tudományos köztudatba az átfogóan új tulajdonságokkal rendelkező grafént és grafánt. Az alig 20 év alatt létrejött tematikus egymásutániság és annak kortársi közelsége rendkívüli fontosságúnak tekintendő a tudományos kutatás jelentőségének bizonyítására. Nem könnyű magyarázatot találni arra, hogy aránylag rövid idő alatt hogyan jöhettek létre ezek a rendkívüli felfedezések, amelyeknek jelentőségét a világ nemzetközi tudományos közössége a legnagyobb elismeréssel kísérte.

Krotót, Curlt és Smalleyt 1996-ban kémiai Nobel-díjjal, Iijimát 2008-ban a Norvég Tudományos és Irodalmi Akadémia által odaítélt Kavli-díjjal [5], Krätschmert 2010-ben az Európai Közösség által létesített „European Inventor of the Year” díjjal [6], Geimet és Novoselovot 2010-ben fizikai Nobel-díjjal jutalmazták.

E sorok írója nem ismer a természettudományok történetében más koherens területet, amelyen ilyen rövid idő alatt az új felfedezések és az elismerések ilyen vagy hasonló koncentrációja figyelhető meg.

A továbbiakban három olyan tényezőre szeretnénk hangsúlyozottan rámutatni, amelyek hozzájárulhattak a széntudományokban bekövetkezett jelentős változásokhoz. Az első a terület kutatása során elért eredmények, ismeretek exponenciális növekedése, illetve azok növekedési sebessége, a második a grafitalapú széntudományok (fullerének, nanocsövek és grafén) területein publikáló szerzők számának növekedése, a harmadik a széntudományi kutatások interdiszciplináris jellege.

### A legújabb kori széntudományi ismeretek (cikkek) számának növekedése

Annak ellenére, hogy a tudományos felfedezések létrejöttének, folyamatainak és működési mechanizmusának megismerése bonyolult folyamat, Price munkássága óta ismert [7,8], hogy a kutatási eredmények akár tudományos cikkek, folyóiratok vagy például kutatók számának kumulatív növekedése révén jól követhetők.

A fullerénekkal, szénnanocsövekkel és a grafénnel foglalkozó folyóiratcikkeknek mint a tudományos információ hordozóinak növekedési ütemét, azaz a szakirodalom növekedését a szénkutatás mindenkor színvonala határozta meg. Minden új kutatási eredmény bizonyos mennyiségű, új kutatási munka elvégzésére sarkallt, mely során ezeket az eredményeket továbbfejlesztették, és/vagy megerősítették. Következésképpen a szénallotrópok szakirodalmának a cikkek  $p(t)$  ( $p$ : publikációk száma) számában visszatükröződő növekedési ütemét a

$$\frac{dp}{dt} = kp$$

differenciálegyenlet írja le. Az egyenlet szerint a  $\frac{dp}{dt}$  növekedési ütem a mindenkor  $p$ -vel arányos, tehát az  $\frac{1}{p} \frac{dp}{dt}$  relatív növe-

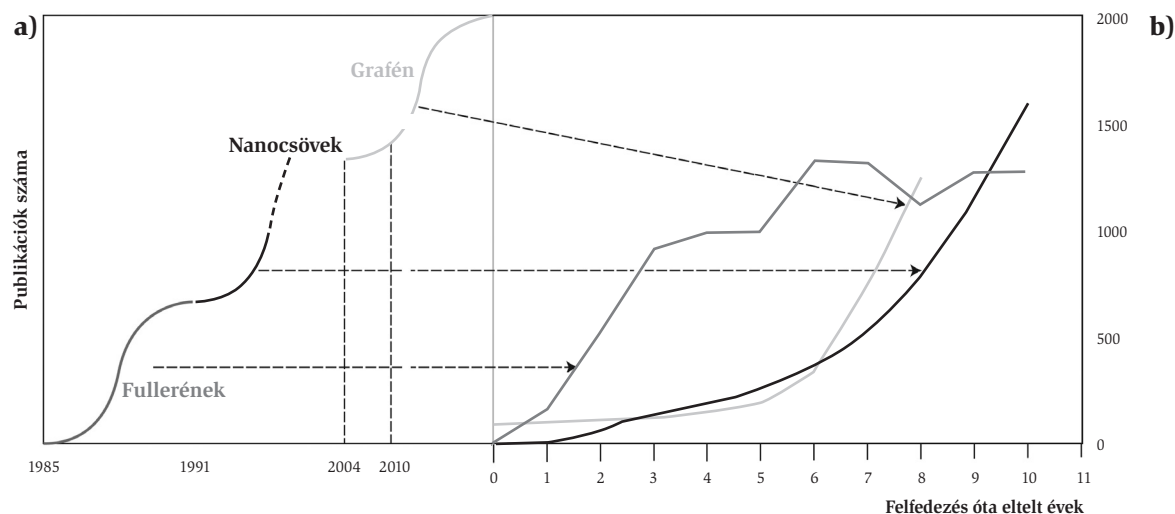
kedési ütem állandó. Az egyenletnek a  $p(0) = p_0$  kezdeti feltételt kielégítő megoldása a

$$p(t) = p_0 e^{kt} \quad (k > 0)$$

exponenciális függvény.

Általában a növekedés csak addig maradt exponenciális, amíg a szakirodalom vagy széntudomány fejlődését megszabó külső körülményekben lényeges változások nem léptek fel. Ilyen változásnak, új fejleménynek tekinthető például a fullerénkutatásban a szénnanocsövek felfedezése. A fenti exponenciális relációval leírt növekedési folyamat a fullerének esetében nem tarthatott

A kristályos szénnanotudomány legújabbkori diadalútja



1. ábra. a) Az ismeretek exponenciális-logisztikus növekedését sematikusán ábrázoló görbesorok [10, átdolgozva].  
b) Az ismeretek exponenciális-logisztikus növekedését ábrázoló valós görbesorok [24, átdolgozva]

örökké: nehezen felderíthető vagy átlátható korlátozó tényezők, például kutatók áttérése a szénnanocsövek kutatásának területére, kötelező érvénnyel és fokozatosan éreztethették, illetve éreztetik hatásukat. Ebben az esetben a növekedés mechanizmusát pontosabban írja le a Pearl-Reed javasolta logisztikus függvény vagy a Gompertz-féle differenciálegyenlet.

Ilyenkor a relatív növekedési ütem már nem állandó, hanem  $p$  lineáris függvénye. Ez annyit jelent, hogy minél nagyobb a  $p$  szintje, annál kisebb a növekedés üteme (1.a ábra).

A növekedés egy másik modellje [9] alapján a fullerén-, nanocső- és grafén- (széntudományi) ismerethalmaz egy gömbhöz hasonlónak fogható fel, amely egy vékony felszíni réteg vagy kutatási front, az „epidermisz” mentén nő, azaz a legfrissebb kutatásokból leszűrt tudással együtt mozgó kutatási frontvonalak mentén halad egy  $n$  dimenziós térben, ahol a dimenziók a kutatási eredmények egymástól független növekedési irányainak felelnek meg. A modellt a

$$\frac{dQ}{dt} = CS(t)$$

differenciálegyenlet írja le, ahol  $Q(t)$  a kutatási ismeretek terjedelme,  $S(t)$  a  $t$  időpontban mért felület,  $C$  pedig valamilyen állandó. Az egyenlet megoldása

$$Q(t) = \beta t^n$$

alakú,  $\beta$  az arányossági tényező. Ez az egyenlet szintén exponenciális növekedést eredményez, ha  $n$ , a tudományos kutatás, mint a rendszer szabadsági fokainak száma, korlátlanul növekszik.

Az exponenciális görbe jól jellemezhető azzal az időtartammal, amely alatt  $p$  értéke a kétszeresére nő ( $T_k$ : kétszereződési idő).

A fentebb vázoltakat tükrözi az 1.a ábrán már előzőleg [10] is részben bemutatott idealizált exponenciális, illetve logisztikus növekedési modell. A publikációk számának valós növekedését bemutató 1.b ábrán megfigyelhető a fullerénkutatási publikációk haladása a logisztikus növekedés felé, valamint a szénnanocsövek és a grafén kutatásának cikkekben megnyilvánuló, még napjainkban is tartó exponenciális növekedése.

A 2. ábrán jól láthatók az exponenciális növekedések kétszereződési idői ( $T_k$ ), azaz azok az időtartamok, amelyek alatt a témában publikált ismeretek száma a duplájára növekedett. Ez persze a növekedések sebességét is jelzi, ugyanis minél rövidebb a kétszereződési idő, annál nagyobb a növekedés sebessége. A széntudomány területén az utóbbi év folyamán tapasztalt exponenciális növekedést létrehozó fejlődést kutatási *eszkálációnak* tekinthetjük.

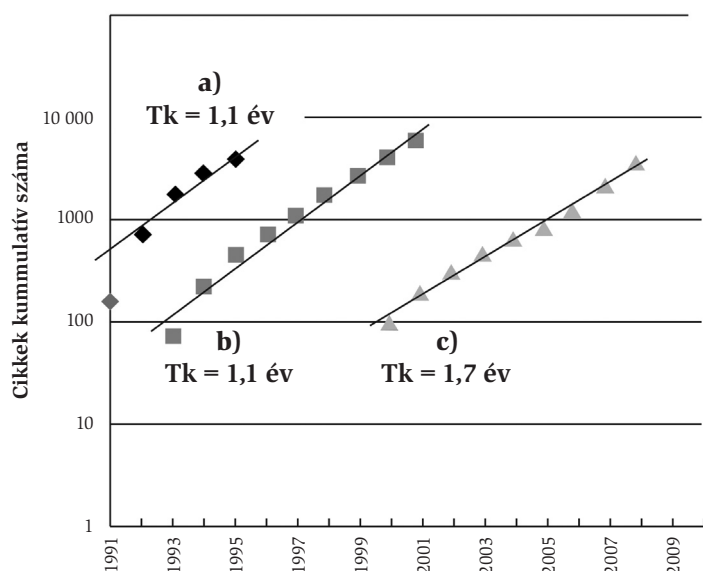
A publikációk által jelzett exponenciális publikációnövekedéseket látványosan jelzi a cikkek idézettsége is, mint például a 3. ábrán bemutatott, a grafénlázát iniciáló cikk [4] idézettségének a terjedése. Az idézettség gyarapodását az ábra úgy mutatja be, mint egy tőba dobott kő által létrehozott hullámok körkörös terjedését.

## A szerzők számának növekedése

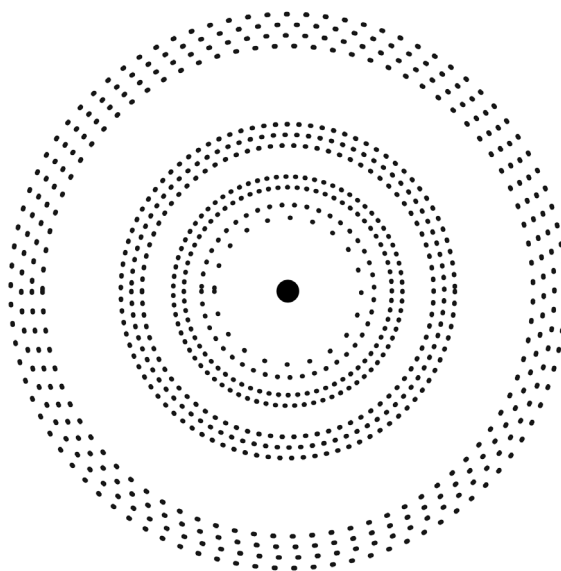
Nemrég kimutatták [11], hogy aránylag egyszerű összefüggés áll fenn a publikált folyóiratcikkek száma és a cikkeket publikáló szerzők száma között, azaz

$$\Delta \text{ cikkek} = C (\Delta \text{ szerzők száma})^\alpha$$

Itt  $\Delta$  (egyéves időtartam alatt publikált) új cikkeket,  $C$  normalizálási állandót és  $\alpha$  skálázási exponenst jelent.



2. ábra. Az exponenciális növekedések sebessége (kétszereződési ideje) [24, átdolgozva]. a) A logisztikussá alakuló fullerénirodalom kezdeti (1991–1995) gyors szakasza. b) A szénnanocső-irodalom növekedési sebessége. c) A grafénirodalom növekedési sebessége



3. ábra. A Novoselov és Geim cikkét [4] (nagy fekete pont az ábra közepén) 2004 és 2009 között idéző cikkek (körkörös pontok) számának hullámszerű terjedése [13]

Ennek megfelelően például az  $\alpha > 1$  értékek azt jelzik, hogy a publikációk egy főre eső értéke, azaz a szerzők cikkproduktivitása olyan mértékben növekszik, ahogyan az illető tudományterület kutatása egyre több kutatót vonz, és a produktivitás időben növekszik. Például a szénnanocsővek esetében ezt a következő egyenlet és a 4. ábra mutatja be:

$$\Delta \text{ cikkek száma} = 0,09 (\Delta \text{ szerzők száma})^{1,32}$$

A grafénkutatásban az  $\alpha$  értéke 1,32-nél nagyobb [12].

Ezért sem nevezhető túlzásnak a Nature Nanotechnology 2010. november 4-i vezércikkének az az állítása, hogy a fullerénnel, nanocsővekkel és grafénnal foglalkozó, növekvő számú szerzőt (kutatót) egybeforrott, egységes témakörösségnek tekint. Mint az egyenlet mutatja, ez a közösség is exponenciálisan növekszik.

## Jövőbeni növekedés, remények

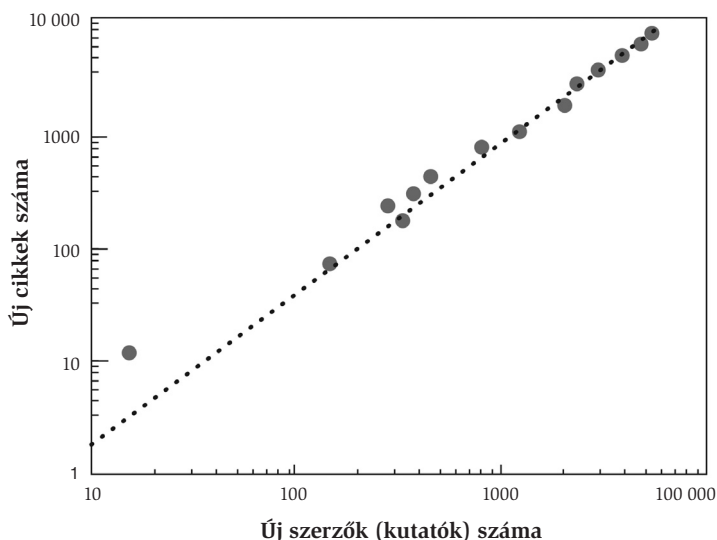
A széntudomány különböző alterületein elért ismeretek robbanásszerű növekedése, a további fejlődési remények már-már szakmai türelmetlenségként jellemezhető elvárásokat is felvetnek. Erre utal például egy nemrég publikált cikk címe: „Buckyballs, nanotubes and graphene: On the hunt for the next big thing” (Fullerének, nanocsővek és grafén: vadászat a következő nagy „valamire”) [13].

Nem fukarkodnak remények kifejezésében a grafénről 2011 elején publikált eszmefuttatások sem.

A Nature Nanotechnology folyóirat „The Rise and Rise of Graphene” (A grafén folyamatos növekedése) címmel közölt magasztaló vezércikket [14], amiben főleg az elektronikai és az abból várható technológiai alkalmazások lehetőségeit hangsúlyozták. Ugyanott emelik ki, hogy a fullerénnel, nanocsővekkel és grafénnal együttesen foglalkozó cikkek száma 1998 óta exponenciális növekedést mutat, és a három széntudományi terület együttes kétszereződési sebessége öt év. Ez különben bizonyos összhangban van az e dolgozatban a három alterületre külön-külön számolt kétszereződési adatokkal is.

Nem kevésbé lelkesedő egy a Nature Materials folyóiratban „It is Still All About Graphene” (Még mindig minden a grafénről szól) [15] megjelent vezércikk.

A grafénismeretek említett robbanásszerű növekedéséhez, mint említettük, az alapkutatással párhuzamosan jelentős műszaki fejlesztések reményeit fűzik. Ezekben rejtőzhetne például a fentebb említett „next big thing” (a következő nagy valami)?



4. ábra. A szénnanocsővekkel foglalkozó cikkek szerzőinek produktivitása (cikk/szerző) [11]

## A kristályos szénnanotudomány legújabbkori diadalútja

Mindez ugyanis egy másik elem, a szilíciumtudományhoz, illetve az abból kifejlesztett műszaki fejlődéshez, fejlesztéshez, a tranzisztortechnológiához kapcsolódhat.

Gordon Moore [16], a világhírű Intel cég egyik alapítója 1959 óta gyűjtött adatok alapján 1965-ben tett előrejelzése azt mondta ki, hogy egy számítógépes chipben tartalmazott szilíciumalapú tranzisztorok száma kétévenként megkétszereződik, ami azt jelentette, hogy a számítógépes műveletek sebessége, a MIPS (Millions of Instructions Per Second) ugyanilyen mértékben gyorsul. Abban az időben a számítógépes processzorok 2200 tranzisztort tartalmaztak. Moore előre jelezte, hogy a következő generációkban fokozatosan olyan chipek épülnek, amelyek egymilliószor összetettebbek lesznek, azaz milliónyi tranzisztort tartalmazhatnak majd. Előrejelzése „Moore törvénye”-ként vált közismertté.

Mint a fentiekből megfigyelhető, a szénkémia (különösképpen a grafén) tudományos kutatásában és a szilíciumra alapozott tranzisztortechnológiai fejlődésben az exponenciális növekedés a közös vonás. Mindmáig azonban nyitott kérdés, hogy milyen mechanizmussal és időben mikor történik, vagy történhet meg az átjárás a tudományos kutatási tevékenységet tükröző cikkek és a műszaki fejlődést jellemző tulajdonság (jelen esetben: az egységnyi felületre felépíthető tranzisztorok száma) exponenciális növekedése között.

Úgy tűnik azonban, hogy a közös nevező, például a fullerének, illetve a szilíciumalapú tranzisztorok esetében az exponenciális növekedés nem tartható fenn korlátlan ideig, illetve az, hogy azt törvényszerűen logisztikus növekedésnek kell követnie. Ennek értelmében egyes hangok már elkezdtek kongatni a lélekarangot a szilíciumalapú tranzisztorok és persze Moore törvénye fölött olyan blikkfangos cíkcímek mögött, mint például „Moore’s Law No More” (Moore törvényével nincs tovább) [17]. Bár a szilíciumtranzisztorokkal kapcsolatos ilyen mértékű pesszimizmus ma még messze nem teljesen indokolt, bizonyos adatok arra engednek következtetni, hogy a nem túl távoli jövőben a Moore-féle exponenciális görbe szerinti tranzisztorméret-csökkenéséből (5. ábra) a jelenlegi körülbelül 22 nm-es szilíciumtranzisztor méretet már valószínűleg nem lehet tovább csökkenteni (egy átlagos emberi hajszál átmérője körülbelül 80 000 nm).

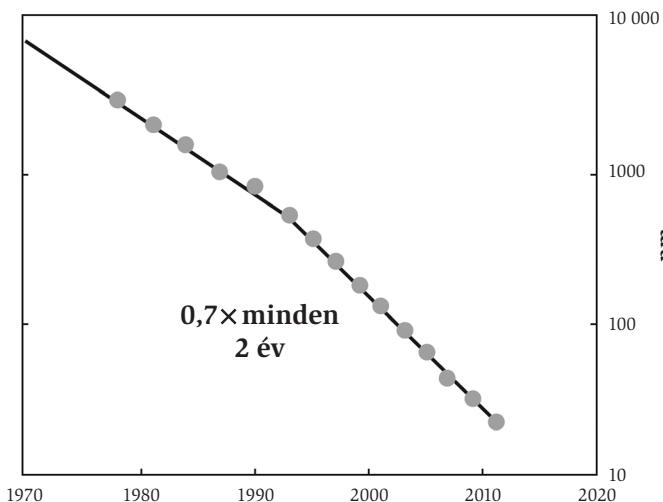
Ez azt jelenti, hogy a nem túl távoli jövőben a szilíciumalapú tranzisztorokat valami új összetételű anyagból állóakkal kellene helyettesíteni.

Erre a feladatra a grafént vélik alkalmasnak. Feltételezik, hogy a grafén alapján a tranzisztorok [20] méretét körülbelül egy szénatomnyi vastagságúra és körülbelül 50 szénatomnyi szélességűre csökkenthetik. Ezt annak alapján is teszik, hogy az ultra-

miniatűr méreteknél a grafén a szilíciumnál stabilabb viselkedést mutat. Ezen az úton a „kvantumpontszerű” [21] chip megépítéséhez remélnek eljutni, ahol az egyedi tranzisztorok mérete már tulajdonképpen nem nagyobb egy molekulánál.

Visszatérve a szilíciumalapú tranzisztortechnológia Moore szerinti exponenciális növekedésének, illetve az azzal járó exponenciális méretcsökkenés 2010-es évek utáni tarthatatlanságához, talán nem túlzott optimizmust tükröz az a feltételezés, hogy a tranzisztortechnológia jövőbeni fejlődését a jelenleg is érvényes graféntudományi kutatás exponenciális növekedése biztosítja majd.

Ilyen értelemben az *exponenciális növekedés (szilícium) exponenciális növekedéséről (grafén)* beszélhetünk. Bármennyire szokatlannak is tűnik ez a feltételezés, bizonyos előzmények fellelhetők a szakirodalomban. Ugyanis 2001-ben publikált dolgozatában a jövőkutató Ray Kurzweil [22] főleg más műszaki fejlődési példákkal illusztrálva feltételezett ilyenfajta növekedést, illetve fejlődést.



5. ábra. Tranzisztorok méreteinek exponenciális csökkenése [16]

1. táblázat. Grafén témájú folyóiratcikkek szakterületi eloszlása

Szakterület	Folyóiratcikkek száma	%
Kondenzált anyagfizika	2701	33
Multidiszciplináris anyagtudomány	2306	28
Alkalmazott fizika	1607	20
Fizikai kémia	1495	18
Nanotudomány, nanotechnológia	1433	18
Multidiszciplináris kémia	1122	14
Multidiszciplináris fizika	1057	13
Atomi, molekuláris és kémiai fizika	418	5

## Interdiszciplináris széntudomány

Mint ismeretes, a fullerének felfedezői, Harold Kroto, Richard Smalley és Richard Curl vegyészek, Wolfgang Krätschmer és Donald Huffman asztrofizikusok. Sumio Iijima fizi kusi alapképzettséget kapott, Andre Geim és Konstantin Novoselov is fizikusok.

Már csak ennek a szakterületi felsorolásnak az alapján is nyilvánvaló, hogy a széntudomány legújabbkori fejlődése kifejezetten az interdiszciplinaritás jegyében zajlott. A huszadik század közepére bizonyos elhanyagoltság után az interdiszciplinaritás fogalma újból teret kezdett nyerni a tudományokban és azok működtetésében (science policy) egyaránt.



## *A kristályos szénnanotudomány legújabbkori diadalútja*

Mindkét kontextusban az interdiszciplinaritás olyan irányzattá vált, amelyet a tudományos kutatás és intézményi rendszere reformjának a szinonimájaként kezeltek [23].

A szénttudományra visszatérve például a grafénkutatás diszciplináris szerkezetének a bemutatását a Reuters–Thomson cég nagy számítógépes adatbázis által feldolgozott folyóirat-összetételének a vizsgálata lehetővé teszi.

Az **1. táblázat** szemlélteti a graféncikkeket publikáló folyóiratok szakterületi beosztásán alapuló százalékos hovatartozásokat.

A kutatások multidiszciplinaritása szembetűnő, bár az eredeti felfedezők (Geim, Novoselov) fizikusi alapképzettsége következtében bizonyos mértékben eltolódik a fizika alterületei felé. Nem vitatható azonban az sem, hogy a kémia és alterületei, valamint a nanotudomány, az anyagtudomány és a nanotechnológia jelenléte is meglehetősen hangsúlyos. Mindezek együttműködése olyan átfedések által meghatározott tudáskiterjedéseket katalizált, amelyek jelentősen hozzájárultak és jelenleg is meghatározzák a szénttudomány jelentős fejlődését.

## Utóirat

Az utóbbi évek szénttudományi előretörését, illetve a fejlődés sebességét tekintetbe véve könnyen elképzelhető, hogy a grafénkutatás exponenciális növekedését és az egy chipen elhelyezhető szilíciumalapú tranzisztorok számának exponenciális növekedését Kurzweil elképzelése szerinti exponenciális kettőződés hozza meg, a Nature-vezércikkben feltételezett „next big thing”-et (következő nagy dolgot) például graféntranzisztorok képében. Azonban az sem zárható ki, hogy valami teljesen váratlanul új szénttudományi ismeret, felfedezés jelenik meg a tudományos kutatás horizontján.

## IRODALOM

- [1] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brian, F. R. Curl, R. E. Smalley, *Nature* (1985) 318, 162.
- [2] W. K. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *Nature* (1990) 347, 354.
- [3] S. Iijima, *Nature* (1991) 354, 56.
- [4] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Shang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firсанov, *Science* (2004) 306, 866.
- [5] The Kavli Prize in nanoscience, <http://op.nature.com/Bhjs1Q>
- [6] Braun Tibor, *Magy. Kém. Lapja* (2010) 64, 371.
- [7] D. de Solla Price, *Science since Babylon*, Yale University Press, New Haven, London, 1975.
- [8] D. de Solla Price, *Kis tudomány, nagy tudomány*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979.
- [9] M. Moravcsik, *Res. Policy* (1975) 4, 80.
- [10] Braun Tibor, *Magy. Kém. Lapja* (2009) 66, 21.
- [11] L. M. A. Bettencourt, D. I. Kaiser, J. Kaur, C. Castillo-Chavez, D. E. Wojick, *Scientometrics*, (2008) 75, 495.
- [12] L. M. A. Bettencourt, személyes közlés
- [13] A. Plume, *Res. Trends* (2010) 12, 9.
- [14] Editorial, *Nature Nanotechnology* (2010) 5, 1.
- [15] Editorial, *Nature Materials* (2010) 10, 1.
- [16] <http://www.intel.com/technology/mooreslaw>
- [17] R. Rockets, <http://www.scienceagogo.com/news/moore.shtml>
- [18] [http://www.cyber-aspect.com/features/feature\\_article-art104.ht](http://www.cyber-aspect.com/features/feature_article-art104.ht)
- [19] <http://www.kurzweilai.net/articles/art0134.html?printable=1>
- [20] Anon. *Science Daily*, February 9, 2009, <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/02/09020502.htm>
- [21] *Science Daily*, April 18, 2008, <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/04/080417142452.htm>
- [22] Wikipedia. Kurzweil and the Law of Accelerating Returns. [http://en.wikipedia.org/wiki/Law\\_of\\_accelerating\\_returns](http://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_accelerating_returns)
- [23] P. Weingart, N. Stehr (Ed.): *Practicizing Interdisciplinarity*, University of Toronto Press, Toronto, 1999.
- [24] A. Barth, W. Marx, [arXiv.org](http://arXiv.org) > 0808.3320, 25 August, 2008.

# Fullerének asztrokémiája

## Bevezetés

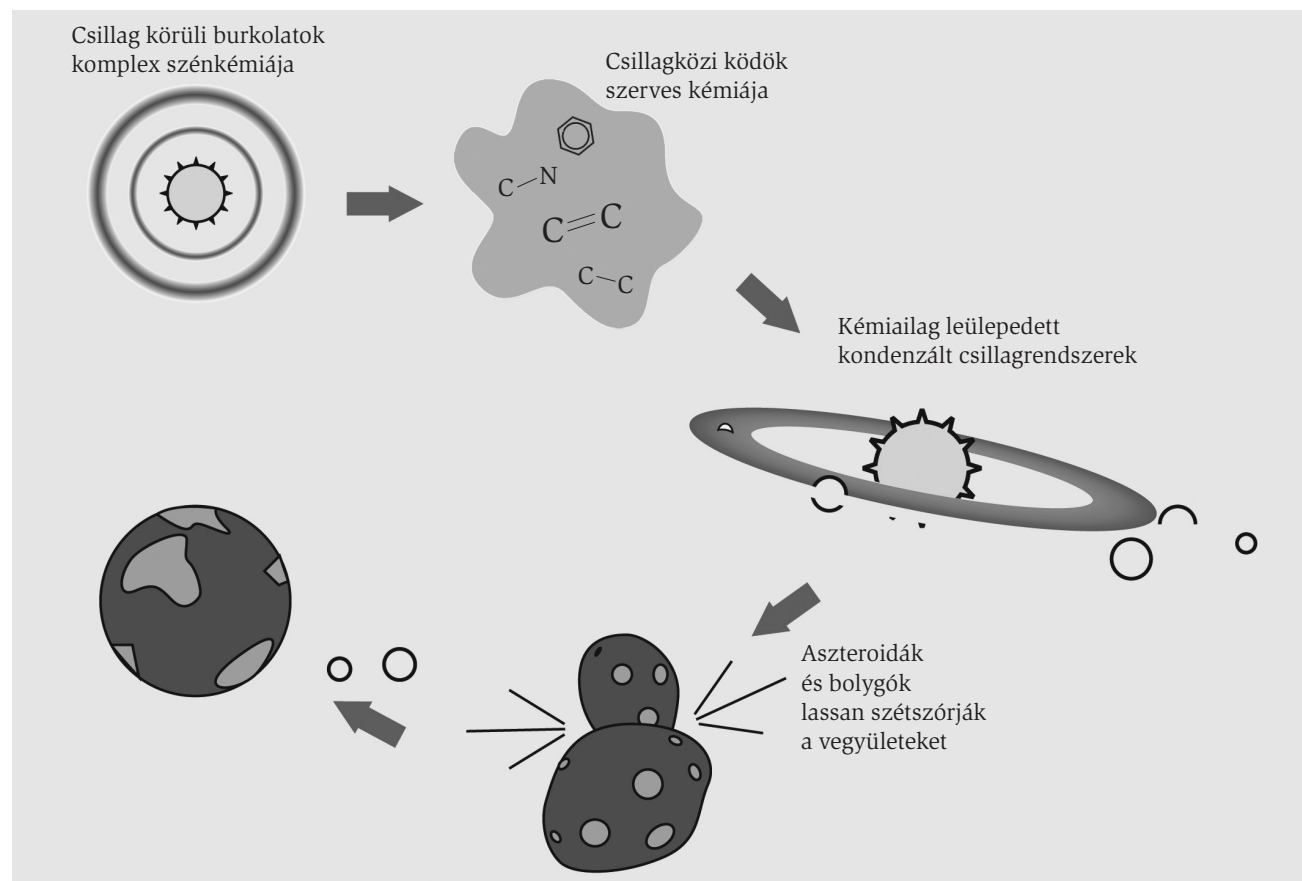
A fullerének felfedezése (1985) [1], majd vegyületként való elválasztása és jellemzése (1990) [2] világszerte nagy érdeklődést keltett és tudományos forradalmat idézett elő a kémiában a huszadik század végén [3], egyszersmind járványszerű kutatási tevékenységi áradatot [4] indított el számos tudományterületen, beleértve a fizikát, a geológiát, a biológiát és az orvostudományokat is [5–7].

Bár furcsán hangzik, a fullerének alapfogolata szó szerint az égből pottyant. Ezt alátámasztja, hogy a felfedezés legelső kidolgozója (H. Kroto) a csillagközi terekben található vegyületek (hosszú láncú szénmolekulák) létevel és vizsgálatával foglalkozó spektroszkópos vegyész volt. Sőt az 1990. évi kémiai felfedezés szerzői asztrofizikusokként végezték kutatásaikat (W. Krätschmer, D. R. Huffman).

Mindhárom kutatónak (és társaiknak) célja az volt, hogy kutatásaik során jobban megismerjék a csillagközi tér összetételét és az ott végbemenő folyamatokat, illetve azok mechanizmusát. Érdekességként azonban feltétlenül megemlíendő, hogy a fullerének felfedezése a véletlen (angolul: serendipitous) felfedezések csoportjába sorolható. Ez kissé bővebben azt jelenti, hogy a kutatók (felfedezők) elindultak egy kiszemelt úton, remélve, hogy ezen az előre elhatározott célhoz érnek. Utólag derült ki, hogy az út nem oda, hanem teljesen váratlan, de szintén hasznos, új érkezési ponthoz vezetett. Ezt a pontot egy új molekulacsalád, a fullerének képezte, és ezek tanulmányozása világszerte lázas kutatási tevékenység tárgya lett.

Ezek után talán nem is annyira meglepő, hogy a fullerénkutatás súlypontja áttevődött ezen molekulák és vegyületeik tulajdonságainak földi vizsgálatára [3–7], és a fullerének csillagközi (égi) jelenlétének, eredetének, tulajdonságainak tanulmányozása bizonyos mértékben a földi vizsgálatokhoz viszonyítva háttérbe szorult.

**1. ábra. Gáz- és szilárd fázisú reakciók számos szerves molekulát hoznak létre a csillag körüli és csillagközi térben. A protoszoláris összeomlás során csillagközi gáz- vagy szilárd fázisban levő molekulák protocsillag-korongokba integrálódtak, és ezekből képződtek a bolygók és kisebb naprendszeri testek. Planétamaradékok, kométák és aszteroidák formájában ütköztek a fiatal planétákkal és szerves anyagot vittek a felületükre [11]**



## Asztrokémiai vizsgálatok

Az elektromágneses sugárzás tekinthető az egyetlen olyan diagnosztikai eszköznek, ami a kutatók rendelkezésére áll a világűrben jelen lévő elektronok, ionok, atomok, molekulák, makromolekulák és szilárd szemcsék (csillagközi por) tanulmányozására. Az utóbbi néhány évtized során csillagászati megfigyelések, laboratóriumi szimulációk és extraterresztriális anyagok elemzése jelentősen hozzájárultak a csillagterekre vonatkozó ismereteinkhez [8–10].

Ezek az adatok kimutatták, hogy az űr kémiája komplex és sokféle (**1. ábra**). Az a tény, hogy ugyanazokat a széntartalmú molekulákat azonosították földi és különböző galaktikus környezetekben, azt sugallja, hogy a szén kémiája univerzális utakat követ [11].

Adva lévén a csillagközi terekben található nagy számú atom és molekula, melyek jelenléte az elektromágneses sugárzás mérésével aránylag egyszerűen kimutatható lenne, kimondottan frusztráló, amikor e komponensek közül több is abszorbeál, polarizál vagy fényt szór a vizsgált vagy ahhoz nagyon közeli sávban, illetve hullámhosszon. A csillagközi terekből származó anyagok asztrokémiai vizsgálatának egyik legjelentősebb problémáját a mérések, megfigyelések ugyanazon anyagok földi laboratóriumi körülmények közötti mérésekkel való összevetése jelenti.

A csillagközi terek sűrűsége még a legdúsabb csillagközi ködöknél is olyan alacsony, hogy gyakran nehezen közelíthető meg a földi vákuumot előállító rendszerekkel. A legtöbb laboratóriumi vizsgálat (szerves) szilárd fázisú anyagok szobahőmérsékleten végzett abszorpciós spektrális mérésére vonatkozik, amiket aztán rendkívül alacsony sűrűségű körülmények között különböző hőmérsékletű (szerves) anyagok emissziós spektrális asztrofizikai megfigyeléseivel hasonlítanak össze. Bizonyos előrehaladást jelentett az alacsony sűrűségű csillagközi körülmények modellezése inert gáz közegekkel. Az ilyen esetekben, sajnos, a mátrix-kölcsönhatások az abszorpciós sávok ismeretlen, illetve előre látható eltolódását okozhatják.

Fejlődést jelentett a (szerves) molekulák laboratóriumi emissziós mérése, ami segítette a molekulák hőmérséklettől függő hullámhossz-eltolódásának az értelmezését.

Elméleti asztrokémiai számítások előre jelzik, hogy bizonyos vegyületeknek ionos állapotban kellene lenniük a csillagközi terek legjobban megfigyelt régióiban. Mind a kvantumkémiai számítások, mind a laboratóriumi kísérletek a sávok relatív intenzitásának, valamint központi hullámhosszainak jelentős változását mutatják ionizált állapotban. Mindezek csillagközi és a laboratóriumi körülmények közötti különbsége jelentősen megnehezíti a csillagközi térben lévő vegyületek pontos azonosítását.

## A csillagközi tér összetétele

Amikor a fulleréneket 1985-ben felfedezték, már léteztek olyan rejtélyes megfigyelések, amelyek a csillagközi térből jövő sugárzásokra vonatkoztak. Ezek közül érdekesekeknek mutatkoztak azok a galaxisból jövő jelek, a diffúz interstelláris sávokként (DIS-eként) ismert emissziós régiók, amelyeket a galaxisunkban és azon túl számos csillag spektrumában azonosítottak [12–14]. Ezeket jellemzően egy 400 nm és 1,3  $\mu\text{m}$  közötti sávban figyelték meg, de kiemelkedőbbeknek az 550 és 650 nm közöttiek bizonyultak. A DIS-ek a sáv szélesség és sávintenzitás széles skáláját mutatják. Mindenhol megtalálhatók galaxisunkon belül és kívül, sőt a szupernóvák vidékén is, ami azt jelzi, hogy:

1. kémiailag stabilisak,
2. gyakoriak és
3. valószínűleg szénalapúak, lévén hogy a szén – a hidrogén, az oxigén és a hélium után – a kozmosz leggyakoribb eleme

(**2. ábra**).

Asztronómiai, valamint laboratóriumi egybehangzó eredmények szerint a DIS-ek gázfázisú speciosekből állnak és összetételük szerint poliaromás szénhidrogének (PAH-ek) [14] vagy fullerének, illetve mindkettő [17].

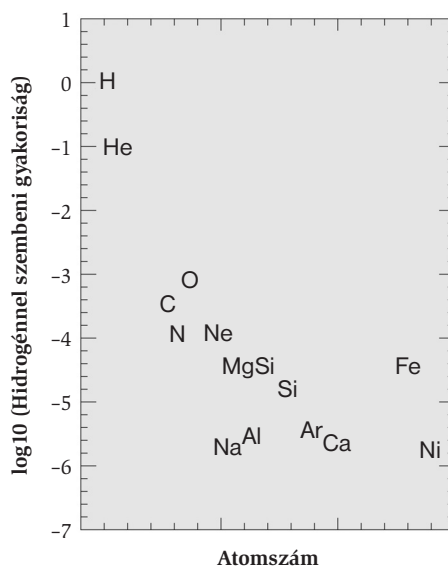
Nagy felbontású spektrális mérések folyamatosan új DIS-eket azonosítanak és ezek száma manapság már több százra tehető [18–20].

220 nm alatt a DIS-eket nehezen tudták azonosítani csillagászati spektrumokban. Ez érvényes a közeli infravörös spektrumtartományokra is, amelyeket a földi légkörből [21] számos tellurikus vonal szennyez. A  $\text{C}_{60}$ -kation és más nagyméretű szénmolekulák átmenetei a közeli infravörösben figyelhetők meg. Számos sáv lehet jelen 1  $\mu\text{m}$  alatt és ezek csak nemrégén hozzáférhetőek a nagy felbontású spektrometriás megfigyelések révén [22]. Egyes szűk DIS-ekben a szubsztuktúrák nagy molekulák rotációs körvonalaiaként értelmezhetők, amelyeknek tehetetlenségi nyomatékuk a  $\text{C}_{60}$ -fullerénvegyületével kompatibilis.

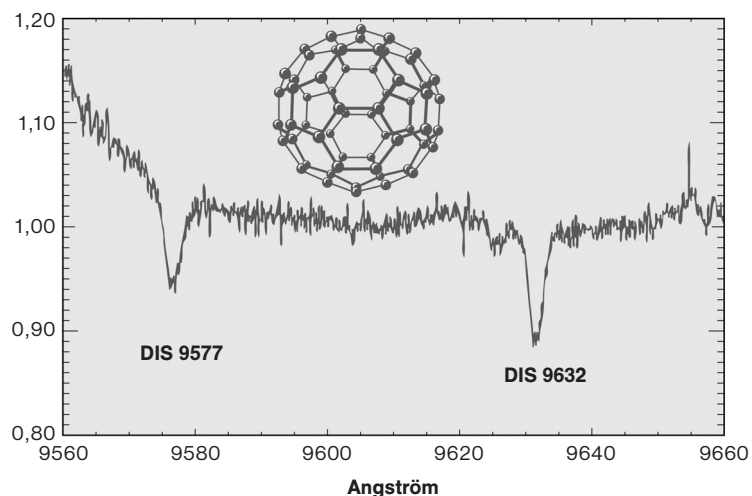
Felvetették, hogy kis mennyiségben fullerének képződhetnek az R Coronae Borealis csillagok burkolatában is [23].

Elméleti modellek a diffúz csillagközi gázban fullerének képződésének lehetőségét a  $\text{C}_2$  láncok felépülésén keresztül  $\text{C}_{10}$ -ig  $\text{C}^+$  beillesztési molekulaion és semleges-semleges reakciókon keresztül feltételezik [24]. Ion-molekula reakciókat is vizsgáltak a fullerénekhez vezető, lehetséges úton [25].

2. ábra. Elemgyakoriságok az űrben



## Fullerének asztrokémiája

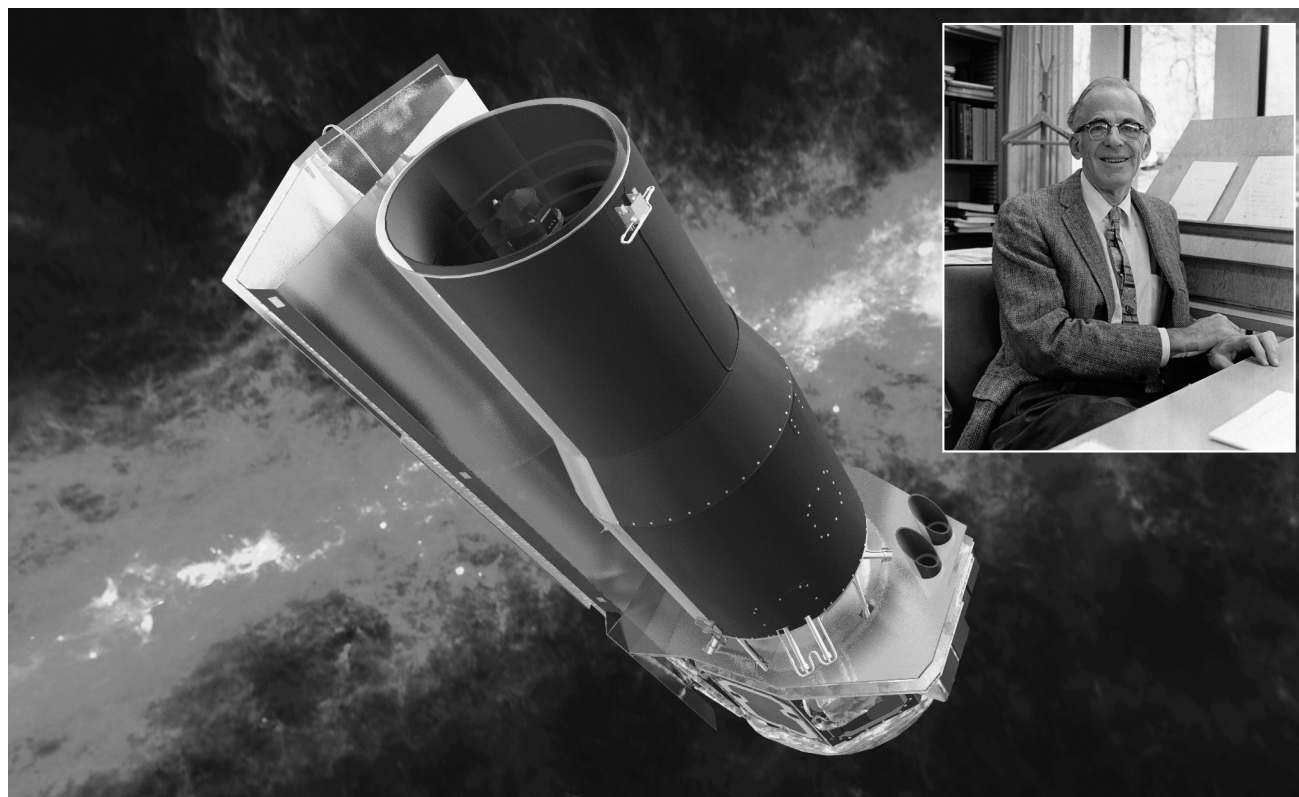


3. ábra. A HD 183143 csillag közeli infravörös spektruma rendkívül száraz körülmények között megfigyelve a Canad France Hawaii-teleszkóppal [31]

és fullerénvegyületek ismeretlen energiáit és átmeneteit elméleti számításokkal kellett ellenőrizni. Talán a legjelentősebb evidenciát a  $C_{60}^+$  néhány infravörös abszorpciós sávjában mért csúcsok és a DIS, valamint a  $C_{60}$  és fullerének, továbbá a hidrogénezett  $C_{60}H_{2n}$  ( $n = 1,30$ ) közötti egyezés mutatja [32, 33].

Egy a protoplanetáris ködből sugárzott fényből arra következtek, hogy az a hidrogénezett amorf szénszemcsékből, különböző hidrogénezettségű fullerének, részben dehidrogénezett, kationos poliaromás szénhidrogén-molekulák (PAH) és szilikátok alkotta konglomerátumból ered [34]. Valószínűtlen, hogy bármelyik szénvegyület domináns mennyiségben legyen jelen. Amennyiben fullerének valóban előfordulnak a csillagközi térben, a fő kérdés az, hogy hol képződtek és honnan kerültek elő. A legáltalánosabb feltételezés szerint a csillagközi (kozmoszbeli) fullerének eredetileg szénben gazdag, hidrogénben szegény csillagok légkörében képződtek, és az erős csillagszelek szállították őket a csillagközi térbe. Szintézisként elképzelhető a szén kondenzálása [35, 36], hidrogénezés [37, 38], gázmolekulák pirolízise [39], amorf hidrogénezés és a szén bomlása [40].

4. ábra. A NASA által felbocsátott és működtetett Spitzer-űrtávcső. A távcsövet Lyman Spitzer (1914–1997) neves űrkutatóról nevezték el (kis képen), aki elsőnek vetette fel az űrtávcső megépítésének a gondolatát





## Fullerének asztrokémiája

Alapos kísérleti eredmények azt mutatják, hogy több más elemi szénminta is képződhet a fullerének mellett, de még mindig nem egyértelmű, hogy ezek közül melyek a leggyakoribbak a releváns asztrokémiai környezetekben.

Jelenleg a csillagközi térben képződő fulleréneket vizsgáló kutatók az amorf szén, szénhagymák, elemi szén és karbinek különböző arányban való keverékének a képződését feltételezik. A csillagközi térbe kerülve a fullerének és a fullerénszármazékok részt vehetnek e környezetek komplex kémiájában.

A  $C_{60}$  ionizálási energiája és a csillagközi ködökben fennálló alacsony UV-fluxus lényegében kizárja a fotoionizálást. Ellenben töltésátviteli elektronleválás a  $C_{60}$ -ról, vagy a protonok és a kozmikus sugarak kölcsönhatása létrehozhat  $C_{60}^{2+}$ -t és  $C_{60}^{3+}$ -t.

Mindkét species mennyiségének csökkenési valószínűségét elektronokkal való  $C_{60}^{+}$ -ionná való részleges semlegesítése okozhatja. Nem egyértelmű, hogy  $C_{60}$ -ionok képződhetnek-e szabad elektron csatlakozásával vagy elektron átadásával negatívan töltött PAH-hal.

Azonban a már képződött  $C_{60}$ -ionoknak meglehetősen stabilaknak kell lenniük, adva lévén a semleges molekula nagy elektromaffinitása. Ellenben a három pozitív molekula reakcióba léphet a csillagközi ködök különböző molekuláival. Ezek reaktivitása a  $C_{60}^{3+}$   $C_{60}^{+}$  irányban csökken. Az eddig tanulmányozott reaktánsok közül kimutatták a  $C_6H_6$ ,  $C_{20}H_{10}$ ,  $C_{14}H_{10}$ ,  $CH_3OH$ ,  $HC_3N$ ,  $NH_3$  molekulákat és több más komponenst.

Egyes komponensekkel az ionok és a semleges  $C_{60}$  [4+2] cikloadduktokat képezhetnek. Kondenzált PAH-okkal, mint például koranulénal az addukt töltésátviteli komplex [41]. A fentiekben idézett cikkek nem tartalmaznak számolt egyensúlyi eloszlásokat a képződhető különböző fullerénmolekulákról, mivel ezek számítása nem végezhető el addig, amíg a  $C_{60}$  és a hidrogén reakciójáról nem áll rendelkezésre több ismeret. De számos utalás van arra, hogy a semleges  $C_{60}$  a legbőségesebben jelen lévő molekula a csillagközi terekben, amennyiben ott egyáltalán létezik.

## Utóirat

Ez a dolgozat a fullerének asztrokémiájának az eredményeit foglalja össze a fullerének felfedezésétől (1995) egészen 2010. július 21-ig úgy, ahogyan a szerző a hozzáférhető szakirodalom alapján bemutathatta.

Ez a dátum ugyanis az az időpont, amikor a szerző a dolgozat végére pontot tett, és azt befejezettnek nyilvánította. Rendkívül érdekes fejleménynek tekinthető, hogy egy közbejött esemény miatt ez a döntés tévesnek bizonyult. Ugyanis 2010. július 22-én jelent meg [42] az Interneten egy a Science folyóiratban publikálandó cikk előzetes változata, ami jelen dolgozat következtetéseit radikálisan megváltoztatta. Az említett cikk ugyanis forradalmian új eredményként, vitathatatlan kísérleti eredményekkel bizonyította azt, ami jelen dolgozatban csak feltételezésekre épülhetett, jelesül, hogy a fullerének (pontosabban a  $C_{60}$  és  $C_{70}$ ) jelen vannak a csillagközi térben.

Az említett dolgozat szerzői a NASA által működtetett 950 kg súlyú Spitzer-űrtávcső (4. ábra) által a Földre küldött emissziós infravörös spektrum számítógépes feldolgozásánál észrevették, hogy annak csúcsai pontosan megegyeznek a  $C_{60}$  és  $C_{70}$  földi körülmények között felvett infravörös spektrumának csúcsaival. Ehhez olyan számítógépes programokat kellett kidolgozni, amelyek szimulálták azokat a körülményeket, amelyek a rögzített spektrumot létrehozták. Mivel a  $C_{60}$  hullámhosszai és sávszélességei hőmérsékletfüggőek, ki tudták számítani, hogy a  $C_{60}$ -sávok relatív intenzitásai a 330 K termikus emisszióknak felelnek meg. A  $C_{70}$ -sávokat úgy számolták, hogy azok a 180 K-es gerjesztéstől érkezzenek.

A Spitzer-űrtávcsövet a NASA Delta-2 rakétájával Cape Canaveralból bocsátották fel bolygók és távoli galaxisok kutatására. A távcső felszereléseire egy infravörös kamera és egy infravörös spektrométer is tartozott. A felvett és feldolgozott spektrum egy déli félgömbi Ara-Camis csillagképhez tartozó TC1 csillagászati jelölésű fehér, új törpecsillag olyan nebulájából származott, ami-ben nagyon kevés a hidrogén, és ezáltal PAH-vegyületek ott nem képződhettek. Ez a TC1 földünkötől körülbelül 6500 fényévnyi távolságra fekszik. Azt is megbecsülték, hogy a  $C_{60}$  és  $C_{70}$  mindegyikének teljes mennyisége a nebulában körülbelül  $10^{23}$  kg, azaz tömegük körülbelül másfélszerese Földünk holdjának. A kanadai, egyesült államokbeli és francia szerzők eredményeit világszenzációként fogadták mindenütt a tudomány eredményei iránt érdeklődők és a szakemberek egyaránt – azzal a meggyőződéssel, hogy ez a felfedezés új utakat nyit az asztrokémia területén, és rendkívül érdekes eredményekhez vezethet a jövőben. A közeljövőre tervezett és a fent ismertetett kutatások folytatására bevetésre készen áll a NASA és a Német Űrkutatási Központ együttműködésében nemrég elkészült, repülőgépre szerelt, SOFIA elnevezésű infravörös spektrométeres űrtávcső.

E dolgozat elején említésre került, hogy a fullerénket 1985-ben véletlenül fedezték fel. Ezek után igazán nem kell és nem is lehet csodálkozni azon, hogy Jan Cami, aki 2010-ben a  $C_{60}$  és  $C_{70}$  űrbeli jelenlétét felfedező kutatócsoportot vezette, egy interjú során szerényen kijelentette, hogy nem ők, hanem a Spitzer-űrtávcső működtetői (NASA) irányították a távcsövet a megfelelő időben a megfelelő helyre. Egy évszázad múlva a fullerének ott fent talán már túl „hidegek” lettek volna ahhoz, hogy érzékeljék őket. Állíthatjuk tehát, hogy ez is véletlen felfedezés? Hozzátehetjük, hogy ennek nincs jelentősége, és akár így, akár másként, a tudomány gazdagabb lett egy jelentős új ismerettel.

## IRODALOM

- [1] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brian, R. J. Curl, R. E. Smalley, Nature (1985) 318, 162.
- [2] W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, Nature (1990) 347, 354.
- [3] Braun Tibor, A káprázatos  $C_{60}$  molekula, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996, 15. o.
- [4] T. Braun, Angew. Chem. Internat. Ed. (1992) 31, 588.

---

*Fullerének asztrokémiája*

---

- [5] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, P. C. Eklund, Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes, Academic Press, New York, 1996.
- [6] H. Ehrenreich, F. Spaepen (Eds.), Solid State Physics, Fullerenes, Academic Press, New York, 1994.
- [7] A. Hirsch, M. Brettenreich, Fullerenes, Chemistry and Reactions, Wiley-VCH, 2004.
- [8] T. Heunig, F. Salama, Science (1998) 282, 2204.
- [9] P. Ehrenfreund, S. B. Charnley, Ann. Rev. Astron. Astrophys. (2000), 38, 427.
- [10] T. Roush, D. P. Conikshank, In: Astrobiology: Future Perspectives, P. Ehrenfreund, W. Irwine, T. Owen, L. Becker, J. Blank, J. Brucato, L. Colangeli, S. Derenne, A. Dutrey, D. Despois, A. Lacazano, F. Roberts, Eds., Astrophys. Space Sci. Library, 305, 149–178., Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht, 2004.
- [11] P. Ehrenfreund, S. Rasmussen, J. Cleaves, L. Chen, Astrobiology, (2005) 6, 490.
- [12] G. H. Herbig, Ann. Rev. Astron. Astrophys. (1995) 3, 19.
- [13] T. Snow, Spectrochim. Acta A (2001) 57, 615.
- [14] P. Ehrenfreund, J. Cami, J. Jimenez-Vicente, B. H. Foing, L. Kaper, A. van der Meer, N. Cox, L. d'Hencourt, J. P. Maier, F. Salama, P. J. Sarre, T. P. Snow, P. Sonnentrucker, Astrophys. J. Lett. (2002) 576, L117.
- [15] J. Sollerman, N. Cox, S. Matilla, P. Ehrenfreund, L. Kaper, B. Leibundgut, P. Lundquist, Astron. Astrophys. (2005) 429, 559.
- [16] F. Salama, E. L. O. Bakes, L. I. Allamandola, A. G. G. M. Tielens, Astron. Astroph., (1996) 488, 61.
- [17] P. Ehrenfreund, B. H. Foing, Planet. Space Sci. (1995) 43, 1183.
- [18] P. Jeniskens, X. Desert, Astron. Astrophys. Suppl. (1994) 105, 39.
- [19] G. H. Herbig, Ann. Rev. Astron. Astrophys. (1995) 33, 19.
- [20] O'Tuarisg, J. Cami, B. H. Foing, P. Sonnentrucker, P. Ehrenfreund, Astron. Astrophys. Suppl. (2000) 142, 225.
- [21] B. H. Foing, P. Ehrenfreund, In G. M. Ticlenc and T. P. Snow, (Eds.), The Diffuse Interstellar Bands, 62–72, Kluwer, Dordrecht, 1995.
- [22] P. Ruiterkamp, N. L. J. Cox, M. Spaans, L. Kaper, B. H. Foing, F. Salama, P. Ehrenfreund, Astron. Astrophys. (2005) 431, 431.
- [23] A. Goeres, J. Sedlmayr, Astron. Astrophys. (1992) 265, 216.
- [24] R. P. A. Bettens, E. Herbst, Astrophys. J. (1997) 478, 585.
- [25] S. Petrie, D. K. Boehme, Astrophys. J. (2000) 540, 869.
- [26] B. H. Foing, P. Ehrenfreund, Nature (1994) 369, 296.
- [27] B. H. Foing, P. Ehrenfreund, Astrophys. Lett. (1997) 317, L59.
- [28] G. H. Herbig, Astrophys. J. (2000) 542, 334.
- [29] A. Sassara, G. Zerza, M. Chergui, S. Leach, Astrophys. J. (1997) 423, 263.
- [30] Z. Gaysna, L. Andrews, P. N. Schulz, J. Phys. Chem. (1992) 96, 1525.
- [31] P. Ehrenfreund, B. H. Foing, Adv. Space Res. (1997) 19, 1033.
- [32] A. S. Webster, Astronom. Astrophys. (1992) 257, 750.
- [33] A. S. Webster, Mon. Not. R. Astron. Soc. (1992) 255, 41.
- [34] P. Garzia-Laro, A. Machado, A. Ulla, M. Mateiga, Astrophys. J. (1999) 513, 941.
- [35] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. Q'Brian, R. F. Curl, R. E. Smalley, Astrophysical Journal (1987) 314, 352.
- [36] H. W. Kroto, Ann. Phys. (Paris) (1989) 14, 169.
- [37] A. Webster, Mon. Not. R. Astronom. Soc. (1993) 263, LSS–L58.
- [38] A. S. Webster, Mon. Not. R. Astronom. Soc. (1993) 264, 121.
- [39] N. Merlin, I. Bohe, C. Reynaud, A. Gahez, J. N. Ronzand, Astron. Astrophys. (1998) 330, 1127.
- [40] D. K. Boehme, Chem. Rev. (1992) 92, 1487.
- [41] S. Petrie, D. K. Boehme, Mon. Not. 2 Astron. Soc. (1995) 268, 103.
- [42] J. Cami, J. Bernhard-Salas, E. Peeters, E. Malek, Science (Express) (2010) 22 July.

## FÜGGELÉK

*Jelen könyvből, terjedelmi okokból kimaradtak olyan cikkek, amik tematikailag köthetők a könyvben megjelentekhez és ismeretterjesztési és aktualitási szempontok alapján szintén számíthatnak az olvasók érdeklődésére. Az alábbiakban ezeket soroljuk fel, a cím mellett feltüntetve a weboldakat, ahol ezek díjmentesen elérhetők.*

### **Briliáns felfedezés**

Nanogyémántok és orvosi biológiai alkalmazásai

Élet és tudomány, 2013/24., [http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi\\_aktak/doc/BrT\\_29.pdf](http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi_aktak/doc/BrT_29.pdf)

### **Nanogyémántok is ragyognak a gyertya lángjában**

Braun Tibor – Nemes László

Természet Világa, 2012. december, [http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi\\_aktak/doc/BrT\\_22.pdf](http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi_aktak/doc/BrT_22.pdf)

### **A gyilkos fegyver**

Polónium-210

Braun Tibor – Vértess Attila

Természet Világa, 2007. március, <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2007/tv0712/2007tartalom.html>

### **A fullerének szerepe a földtörténeti kihalások okaiban**

Egy téves hipotézis krónikája

Magyar Tudomány, 2011/3, [http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi\\_aktak/doc/BrT\\_13.pdf](http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi_aktak/doc/BrT_13.pdf)

### **Szemléletek ütközése.**

Eric Drexler és Richard E. Smalley nyilvános levélváltása a nanoméretektudományról

Természet Világa, Napjaink kémiája, 2007. I. különszám, pp. 72

<http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2007/tv0712/2007tartalom.html>

### **Egy itthon méltatlanul kezelt magyar találmány**

A Takátsy-mikrotitrátor és a laboratóriumi mikrolap világsikere

Braun Tibor – Lomniczi Béla

Magyar Tudomány, 2014/9., [http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi\\_aktak/doc/BrT\\_38.pdf](http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi_aktak/doc/BrT_38.pdf)

### **Villanások a táplálkozás néhány meglepő kémiai törekvéséről**

[http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi\\_aktak/braun\\_cikkek.html](http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi_aktak/braun_cikkek.html)

### **A quinghaosu (artemizinin) felfedezése**

A kínai kulturális forradalom és a malária gyógyítása

Természet Világa, 2012. augusztus, [http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi\\_aktak/doc/BrT\\_25.pdf](http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi_aktak/doc/BrT_25.pdf)

### **Cherenkov-sugárzás**

Egy nukleáris kémiai eponima viszontagságos keletkezése és sokat ígérő jövője

[http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi\\_aktak/braun\\_cikkek.html](http://www.mtak.szi.iif.hu/kszi_aktak/braun_cikkek.html)

## TÁRGYMUTATÓ

- 3D nyomtatás  
 elve, 31, 38  
 fejlődés iránya, 32  
 huzalok, akkumulátorok, 35  
 kémiai laboreshközök, reaktorok  
 nyomtatása, 33  
 mesterséges húskészítmények, 35  
 mesterséges szervek, erek, 36  
 számítógép vezérelt reagens  
 adagolás, 34
- 4D nyomtatás: alakemlékező  
 polimerek, 38  
 alakváltozás elektromos feszültség  
 hatására, 42  
 alakváltozás fény hatására, 41  
 alakváltozás külső behatásra, 39  
 alakváltozás mágneses erő  
 hatására, 43  
 alakváltozás vízbe mártás  
 hatására, 41
- Adattárolás  
 DNS-ben, 86  
 kvarclapkákban, 86
- Aerogélek  
 alkogélek, 150  
 előállítása, 149  
 légiesen ultrakönnnyű aerogélek, 150  
 szerves polimerek aerogéljei, 150  
 szénnanocső és grafén aerogélek, 151  
 szilika aerogélek, 150  
 tulajdonságai, 149
- Al-Co-Ni szerkezet, 19
- Artemisia annua L  
 malária ellenes hatás, 109  
 termesztése a világban, 110
- Artemizinsav szintetikus biológiai  
 előállítása, 111
- Áramlásos befecskendezési analízis  
 (FIA), 123
- Bakteriális fermentáció, 72
- Biomimetika definíciója, 116
- Bioreaktor, 89
- Biosztát, 89
- Biotechnológia definíciója, 89
- Buckminsterfullerén, buckyball, 152
- Cibetmacska, 89
- Detonációs nanogyémántok  
 diszpergálása, 160  
 fázisdiagramja, 158  
 funkcionálizálása, 161  
 stabilitása, 159
- szintézise, 158  
 tisztítása, 159
- Diamágneses anyagok levitációja, 18
- Diffúz intersztelláris sávok, (DIS), 183
- DNS és vírusok lenyomata vízben, 98  
 homeopátia, 100  
 tiszta víz szerkezete, 100  
 „vízmemória” hipotézis, 100
- DNS szekvenálás  
 grafénmembránokon, grafén-  
 szalagokon, 107  
 költségének időbeli változása, 105  
 nanopórusos eljárás, 107  
 Sanger szekvenálás, 106
- Elemgyakoróságok az űrben, 183
- Energia fogyasztás világszinten, 140
- Eponima  
 fogalma, 138, 153  
 jelentősége, 153
- Erjedés, erjesztés  
 erjesztett élelmiszerek  
 és termékek, 75  
 fajtái, 74  
 sajtok, mint mikrobiális  
 közösségek, 78  
 starterek, 74  
 terroir: erjesztő gomba és a helyi  
 gombák együttes hatása, 77
- Erjesztett élelmiszerek földrajza, 73
- Exponenciális adat és információ  
 növekedés, 86
- Extrém híg vizes oldatokban  
 nemegyensúlyi rendszerek, 101  
 disszipatív szerkezetek, 101
- Élelmiszerek illóanyagainak  
 meghatározása, 54
- Ételkombinációk azonos ízvegyületek  
 alapján, 54
- Folyamatos áramlásos analízis (CFA), 122
- Fotovoltaika, 141
- Földrengés  
 előrejelzés, 24  
 Lima, Peru, 25  
 Szendai, Japán, 23
- Fullerének  
 C<sub>60</sub> és C<sub>70</sub> űrbeli jelenlétének  
 bizonyítása, 185  
 feltételezett keletkezési módjai  
 az űrben, 184
- Gartner ciklus, 32
- Geodetikus kupola, 152
- Gélek  
 fajtái, 148  
 fogalma, 148
- Grafén előállítása  
 epitaxiális növesztéssel, 170  
 kémiai gőzlerakódással, 170  
 kémiai hántolással, 169  
 közvetlen kémiai szintézissel, 170  
 mikromechanikai hántolással, 169  
 szénnanocsővek hosszanti  
 felhasításával, 170
- Hirsch-index, 138
- HIV vírus és az AIDS, 97
- HIV vírus felfedezésének elsőbbségi  
 vitája, 98
- IgNobel-díj, 19
- Íz- illat- zamathálózatok, 56
- Ízlelés mechanizmusa, 53
- Kapszaicin, 58
- Karotinoid pigmentek, 58
- Kávéfűró bogár  
 koffeinrezisztenciája, 83  
 új út a növényvédelemben, 84
- Kemosztát, 89
- Kémiai robotika, 118
- Klónozás. 10
- Koffein  
 hatásmechanizmusa a szervezetben, 81  
 szerkezete, bioszintézise, 81, 83
- Kolloidok, diszperz rendszerek, 47
- Kopi luwak, 89
- Kopi Luwak és hagyományos kávék  
 fehérje tartalma, 91  
 feldolgozása, 91  
 íze, illata, 91  
 kávéfajták differenciálása markerek  
 alapján, 93  
 koffein tartalma, 91
- Kopi Luwak hasonmások, 94
- Kvázikristályok, 19
- Laborkártyák (lab-on-a-chip), 125
- Lamináris és turbulens áramlás, 124
- Lágytojás főzés, 48
- Lima, Peru  
 földrengés, 1970. máj. 31., 25  
 személyes élménybeszámoló, 25
- Maillard-reakció, 50, 91
- Meissner-hatás, Meissner-Ochsenfeld-  
 effektus, 133
- Metabolomika, 93
- Mikrotitrátor, 121
- Molekuláris gasztronómiai gyöngyök  
 céklakaviár, 51



- gyöngyösítés, 51  
nátrium-alginát, 51  
Molekuláris gasztronómia születése, 46  
Moore-törvény, 104, 141, 142, 171, 180
- Nanorobotika, 118  
Napelemek  
felépítése, 145  
működési elve, 141  
tandem és totális tandem nap-  
elemek, 146  
Nátrium-L-glutamát, mint ízfokozó, 53
- Okló jelenség  
hasadási termékek mennyisége, 130  
oklói fosszilis nukleáris ősreaktorok,  
130  
oklói uránérc bánya, 129  
természetes urán izotóp arány  
anomália, 130
- Paprika csípősségének mértéke  
folyadékkromatográfiás módszer,  
ASTA eljárás, 61  
Scoville-módszer, 60  
Scoville skála, 60  
Paprika okozta égő fájdalomérzet  
mechanizmusa, 60  
Patológias tudomány fogalma, 96  
Perovszkitok  
hibrid perovszkitok szerkezete, 143  
hibrid perovszkitok fotoenergia  
hasznosítása, 143  
magas hőmérsékletű szupravezetés  
elméletei, 138  
szerkezete, 134, 142  
szintetikus perovszkit vegyületek, 135
- Poszméhek színes mintafelismerése, 21
- Robot, robotika definíciója, 113  
Robotok fajtái  
Belouszov-Zsabotyinszkij reakció  
alapján lépegető gél robot, 117, 118  
helyváltoztató robotok, 115  
mikrolemezek, 114  
pipettázó robot, 114  
pneumatikus működtetésű  
robotok, 116
- Spitzer űrtávcső, 184  
Stigler-törvény, 153  
Stradivari hegedű  
a fa anyagának kémiai összetétele, 16  
a fa anyagának szerkezete, 14  
gombok szerepe a faszerkezet  
átalakításában, 17  
lakkozáshoz használt anyagok, 15  
mítoszok, cáfolatok, 13  
Strecker-reakció, 50, 91  
Swanson-törvény, 142  
Szarvasgomba  
aromavegyületei, 68  
élettana, 66  
fajtái, 64  
gasztrotörténete, 65  
keresése, 66  
Számítógépes adatbázisok étel-  
alapanyagok párosításához, 55  
Szendai, Japán  
egyetemi oktatás, 23  
földrajzi fekvése, 23  
földrengés, 2011. márc. 11., 23  
fukusimai nukleáris katasztrófa, 24  
szökőár, 24
- Szénallotrópok  
a széntudomány inter-  
diszciplinaritása, 180  
a területen dolgozók számának  
alakulása, 178  
szakirodalmának időbeli  
alakulása, 177  
Szénnanohagymák  
előállítás, 164  
funkcionalizálása, 164  
kémiai tulajdonságai, 164  
szerkezete, 163  
Szintetikus biológia definíciója, 111  
Szupravezetés átmeneti  
hőmérséklete, 133  
Szupravezetési mágnes lebegtetés, 133  
Szuvid (sous vide) sütés, főzés  
az eljárás lényege, előnyei, 49  
hőmérséklet hatása a hús  
szerkezetére, 50  
húsisom szerkezete, 50  
szuvid berendezések, 49
- Tyúktojás belső szerkezete, 48  
Vizualizálás  
háromdimenziós felületek, 29  
Mengelejev periódusos  
rendszerei, 28  
Napóleon oroszországi hadjárata, 28  
tudományterületek kapcsolat  
rendszere, 29
- Zöld fluoreszcens fehérje (ZFF). 9. 10  
felfedezésének története, 11

## NÉVMUTATÓ

- Abbott, E. A., 167  
 Adria, F., 51  
 Ahnert, S., 56  
 Apicius, M. G., 65  
 Asimov, I., 168
- Ball, Ph., 100, 101  
 Barabási A.-L., 56  
 Barré-Sinoussi, F., 98  
 Barton, J., 100  
 Becquerel, A. E., 141  
 Bednorz, J. G., 134, 137  
 Belcher, R., 9  
 Benveniste, J., 100  
 Benzi, F., 54  
 Berlinger, W., 134  
 Berry, M., 19  
 Blumenthal, H., 54, 76  
 Bohr, N., 127, 139  
 Bouziges, H., 130  
 Börner, K., 27  
 Brieva, A. C., 165  
 Brillat-Savarin, J. A., 45, 63, 66, 72  
 Brodi, E., 83  
 Brody, O., 32  
 Bruegel, P., 96  
 Buchhelm, R., 59  
 Bucholz, Ch. F., 59  
 Buckminster Fuller, R., 152  
 Büchner, E., 74
- Cami, J., 185  
 Capek, K., 113  
 Careme, M.-A., 46  
 Chalfie, M., 9  
 Chang, D., 76  
 Chauca, D. A., 59  
 Cho, A., 138  
 Chu, P., 135  
 Cicero, 65  
 Collins, R. W., 134  
 Crump, S., 32  
 Curl, R., 157, 177, 180  
 Csang Csun-csiao, 109  
 Csapó I., 58  
 Csiang Csing, 109  
 Csupor D., 110
- Danilenko, V. V., 158, 164  
 Darling, S. F., 59  
 De Kruif, P., 72  
 Dévényi T., 156  
 Diószeghy S., 110  
 Dioszkoridész, 65  
 Döblinger, M., 19  
 Ducasse, A., 71
- Echegoyen, L., 164, 165  
 Ehrlich, P., 72  
 Erdős P., 81  
 Ereky K., 89, 111  
 Euler, L., 20, 152
- Fehér Zs., 123  
 Fermi, E., 127  
 Field, R. J., 117  
 Fuhr, K., 13
- Gagnaire, P., 47  
 Gallo, R., 97, 98  
 Gates, B., 112  
 Geim, A. K., 18, 168, 176, 177, 180  
 Gerwert, K., 100  
 Gibbs, J. W., 29  
 Gibelli, G., 66  
 Gillette, M. H., 61  
 Gutenberg, J., 31
- Hansen zur, H., 98  
 Hargittai I., 9, 97  
 Hazen, R. M., 136, 137  
 Hessel, V., 47  
 Hirsch, J. E., 138  
 Hobbes, Th., 96  
 Hovmöller Zou, L., 19  
 Hovmöller, S., 19  
 Högyes E., 59  
 Huffman, D., 157, 177, 180, 182  
 Hull, Ch., 32
- Iijima, S., 177, 180  
 Inagaki, Y., 59
- Jao Ven-jüan, 109  
 Julius, D., 60  
 Juvenalis, 65
- Karinthy F., 72  
 Khabashesku, V. N., 165  
 Kiesling, R., 111  
 Kinaret, J., 175  
 Kistler, S., 148  
 Kolumbusz, K., 59  
 Kosuge, S., 59  
 Kőrös E., 117  
 Krätschmer, W., 157, 177, 180, 182  
 Kroto, H., 152, 157, 177, 180, 182  
 Kuroda, P. K., 128, 130  
 Kurzweil, R., 106, 180  
 Kuznetsov, V. I., 164  
 Kürti M., 46, 48, 53, 76
- Lahousse, B., 54, 55  
 Langmuir, I., 96  
 Laughlin, R. B., 138  
 Laveran, Ch. L. A., 109  
 Lavoisier, A.-L., 46, 47  
 Learned, Ch., 148  
 Leeuwenhoek van, A., 72  
 Lehn, J.-M., 52  
 Lerch, M., 54  
 Lotto, B., 21  
 Lucullus, L., 65  
 Luszczyn, J., 165
- MacDonald, A. H., 168  
 Maillard, L., 50  
 Maxwell, J. C., 29  
 McLuhan, M., 31  
 Mehta, Z., 58  
 Menuhin, Y., 15  
 Merton, R., 96, 135, 138, 153  
 Micko, K., 59  
 Minard, Ch. J., 28  
 Miyasaka, T., 143  
 Montagnier, L., 96, 97, 98  
 Moore, G., 104, 171, 180  
 Motolla, H. A., 122  
 Müller, K. A., 134, 137  
 Myers, P. Z., 100
- Nagame, Y., 24  
 Nagyváry J., 15  
 Nelson, E. K., 59  
 Nemes L., 96  
 Nobel, A., 9  
 Noble, A. C., 67  
 Novoselov, K., 18, 176, 177, 180  
 Noyes, R. M., 117
- Paganini, N., 63  
 Palkar, A., 165, 166  
 Park, R. L., 96  
 Pasteur, L., 45, 74  
 Perlmann, I., 15  
 Perovski, L. A., 142  
 Philoxenosz, L., 65  
 Platina, B., 66  
 Playfair, W., 27  
 Plutarkhosz, 65  
 Pralus, G., 49  
 Prasher, D., 9, 10  
 Price deSolla, D. J., 167, 177  
 Pungor E., 123
- Reimers, J., 100  
 Reynolds, O., 124  
 Ribbe, P., 96

Rose, G., 142  
Rossini, G., 63  
Ruzicka, J., 123  
  
Sano, N., 164  
Scholes, G., 100  
Schuster, G., 99  
Scoville, W. L., 60  
Seaborg, G. T., 131  
Serway, R. A., 134  
Shechtman, D., 19  
Shimomura, O., 9  
Skeggs, L., 122  
Smalley, R. E., 152, 157, 177, 180  
Snaith, H., 144, 146  
Spath, E., 59  
Spitzer, L., 184  
Stern, I., 14  
Stewart, K. K., 123  
Stigler, S. M., 153

Stradivari, A., 13  
Suzuki, N., 23  
Swanson, R., 142  
Szántó Gy., 13  
Szent-Györgyi A., 58  
Szilárd L., 127  
  
Takátsy Gy., 114, 120  
Tanaka, Sh., 135, 138  
Tesla, N., 140  
Theophrasztosz, 65  
This, H., 46, 47, 76  
Thompson, B., 46  
Tölgyessy, J., 26  
Tresh, J. C., 59  
Tsien, R., 9

Ugarte, D., 163  
  
Vang Hung-ven, 109  
Véga, F., 83  
Vitello, G., 100  
Vonnegut Jr., K., 72  
  
Wu, M.-K., 135  
  
Xiaodong Zou, 19  
  
Yoshihara, K., 23  
  
Zanini, F., 17  
Zhang, Sh., 139  
Zichichi, A., 47  
Zuckerman, H., 9, 97, 156  
Zuckerman, P., 14

## TARTALOMJEGYZÉK

### ELŐSZÓ

Braun Tibor előszava .....	5
Felkért szerző: Kiss Tamás egyetemi tanár, a Magyar Kémikusok Lapjának felelős szerkesztőjének beköszöntője .....	7

### CÍMFEJEZET

A kémiai Nobel-díjra érdemes taxisofőr .....	9
<i>Douglas Prasher és a tudományos kutatás anyagi támogatottságának diszkrét bája</i>	

### ÁLTALÁNOS KÉMIA

Mitoszrombolás hegedűvel .....	13
<i>Stradivari-hangszerek akusztikai, kémiai és biotechnológiai jellemzése</i>	
Publikálj vagy pusztulj, a napos oldalról .....	18
Szendai .....	22
<i>A hely szelleme</i>	
Tudományos kutatási adatok és ismeretek vizuális megjelenítése .....	27
<i>Rendhagyó könyvbemutató</i>	
Gutenbergtől egy új kémiáig? .....	31
<i>3D nyomtatás és nyomtatók térben és időben</i>	
4D-nyomtatás és önépítés alakemlékező polimerekkel .....	38

### GASZTROKÉMIA

Empíriától a tudományig .....	45
<i>Molekuláris és szupramolekuláris gasztronómia</i>	
Gasztronómiai íz-, illat- és zamatpárosítások molekuláris háttere és új lehetőségei .....	53
Gasztro-mazochizmus .....	58
<i>Csilipaprika-kémia, a Scoville-skála és az ízcsípősségi világrangsor</i>	
A gasztronómia gyémántja .....	63
<i>Kémiai és történelmi oknyomozás az aranyértékű szarvasgomba világsikeréről</i>	
Mikrobiális gasztronómia .....	72
<i>Erjesztéses ízgerjesztés baktériumokkal, baktérium közösségekkel, gombákkal és penészekkel</i>	
Viharfelhők a világ kávétermelése és kávéital-fogyasztása felett .....	81
<i>Elhárítási remények biokémiai-mikrobiológiai kutatással</i>	

### BIOKÉMIA, KÉMIAI BIOLÓGIA, BIOTECHNOLÓGIA, GYÓGYSZERKÉMIA

Adat-, információ- és ismerettárolás az örökösségnek .....	85
<i>Remények kvarchban és DNS-ben</i>	
Bizarr testközeli biotechnológia .....	89
<i>A Kopi Luwak indonéz luxuskávé</i>	
A DNS leképezése vízben: valóság vagy patológiás tudomány? .....	96
<i>Haditudósítás egy vitatott kutatási téma frontvonaláról</i>	
Moore törvénye és a DNS-szekvenálás legújabb kori fejlődése .....	104



Mao elnök által kezdeményezett maláriaellenes gyógyszerkutatás: az artemizinin felfedezése .....	109
<i>Kémiai múlt, biotechnológiai jelen és jövő</i>	

## AUTOMATIZÁLÁS ÉS ROBOTIKA A KÉMIÁBAN

Robotok és automatizálási robotika a kémiában és a kémia körül .....	113
Miniaturizálás és automatizálás az analitikai kémiában .....	120
<i>Lépések a kémcsőtől az integrált mikrofluidikai laborkártyáig vezető úton</i>	

## NUKLEÁRIS KÉMIA

A nukleáris kémikus, aki előre látta a múltat .....	127
<i>Paul Kazuo Kuroda és az oklói ősszeaktorok</i>	

## ANYAGTUDOMÁNY

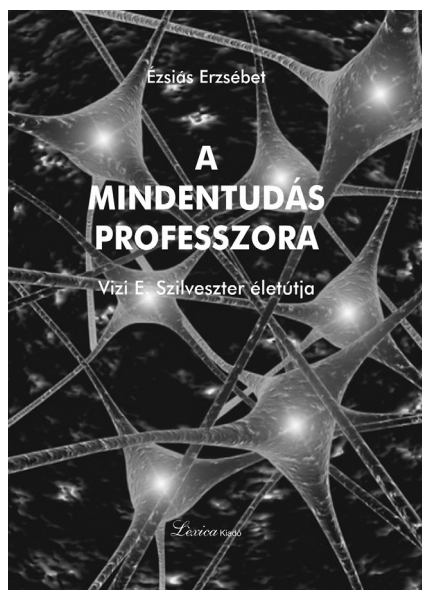
Félúton a magashőmérsékletű szupravezetők kutatásában .....	132
<i>Vetélkedés, versenyfutás és siker</i>	
Napenergia-felhasználási remények .....	140
<i>A perovszkitkutatás másodvirágása: hibrid perovszkit napelemek</i>	

Kémiai kutatás fogadásból .....	148
<i>Aerogélek és légiesen ultrakönnnyű (LUK) aerogél szerkezetek</i>	

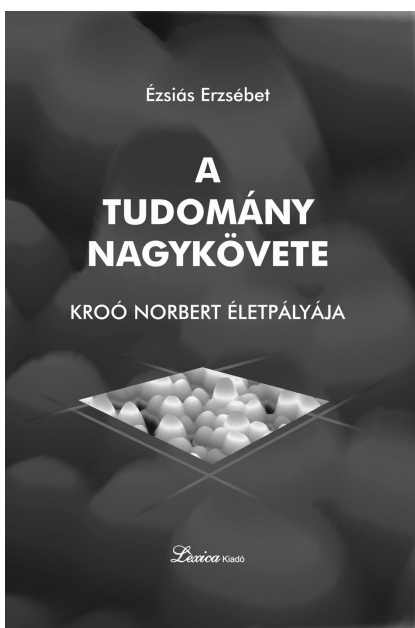
## SZERVES KÉMIA, FULLERÉNKÉMIA, NANOKÉMIA, GRAFÉNKÉMIA

A kémiában halhatatlanná vált építész .....	152
<i>Buckminster Fuller és a fullerének</i>	
Akiket szintén esélyesnek tartottak: keserédes kémiai Nobel-díj 1996-ban .....	156
A szénnanokémia ékszerei .....	158
<i>Detonációs nanogyémántok</i>	
A kristályos szénnanokémia matrjoskababái .....	163
<i>A szénnanohagymák kémiája</i>	
A kétdimenziós nanokémia ígéretes világa .....	167
<i>Grafén: a grafit hántolásától a szén nanocsövek kicipzározásáig</i>	
Égbeszökő grafénkutatás .....	174
A kristályos szénnanotudomány legújabbkori diadalútja .....	177
<i>Interdiszplináris fulleren-, nanocső- és grafénkutatási eszkaláció</i>	
Fullerének asztrokémiája .....	182
FÜGGELÉK .....	187
TÁRGYMUTATÓ .....	188
NÉVMUTATÓ .....	190

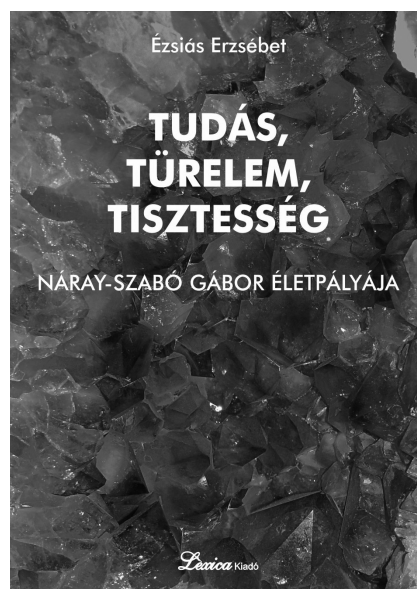
## A LEXICA KIADÓ gondozásában eddig



Ézsiás Erzsébet  
**A MINDENTUDÁS  
PROFESSZORA**  
*Vizi E. Szilveszter*  
*életútja* | 2011



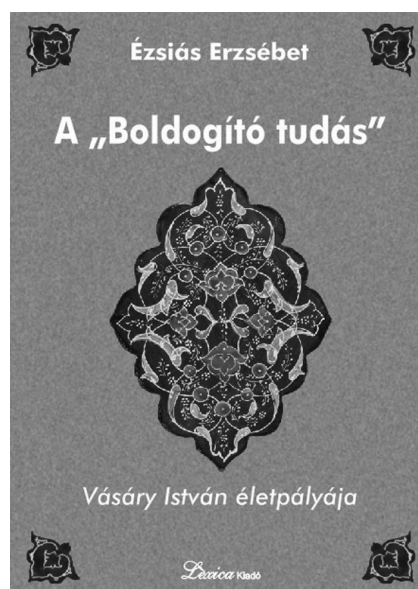
Ézsiás Erzsébet  
**A TUDOMÁNY NAGYKÖVETE**  
*Kroó Norbert* *életpályája* | 2013



Ézsiás Erzsébet  
**TUDÁS, TÜRELEM,  
TISZTESSÉG**  
*Náray-Szabó Gábor*  
*életpályája* | 2013

[www.le](http://www.le)

megjelent „Magyar Tudósok” sorozat könyvei



Ézsiás Erzsébet  
**A „BOLDOGÍTÓ TUDÁS”**  
Vásáry István életpályája | 2015

Ézsiás Erzsébet  
**VIHAROS VIZEKEN**  
Vajna Zoltán életpályája | 2014

Lexica Kiadó | 1141 Budapest, Lipótvár u. 37.

**lexica.hu**



Felelős kiadó: **dr. Simon Judit**, a Lexica Kiadó ügyvezetője

Borítóterv, grafikai kivitelezés: **Braun András**

Tipográfia, tördelés, nyomdai előkészítés: **Horváth Imre** (*Planta-2000 Bt.*)

Készült a **G-Print Nyomdában**

Felelős vezető: **Wilpert Gábor**

ISBN: 978-615-80344-0-1